



**UNIVERSIDAD DE LA CORUÑA**  
**E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos**  
**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**



*Tesis Doctoral*

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES  
DE ADHERENCIA DE CORDONES DE PRETENSADO  
EN ELEMENTOS PREFABRICADOS DE HORMIGONES  
DE ALTAS PRESTACIONES INICIALES**

AUTOR:

*Cristina Vázquez Herrero*

DIRECCIÓN:

*Fernando Martínez Abella  
Manuel Casteleiro Maldonado*



UNIVERSIDAD DE LA CORUÑA  
E.T.S. INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS  
Departamento de Tecnología de la Construcción



**ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES  
DE ADHERENCIA DE CORDONES DE PRETENSADO  
EN ELEMENTOS PREFABRICADOS DE HORMIGONES  
DE ALTAS PRESTACIONES INICIALES**

*Trabajo realizado como requisito para obtener el grado de  
Doctor, por:*

***Cristina Vázquez Herrero***

*Directores:*

***Fernando Martínez Abella  
Manuel Casteleiro Maldonado***

*A Coruña, Diciembre de 2000*



## AGRADECIMIENTOS

Mi gratitud y reconocimiento se dirige, en primer lugar, a los Directores de esta Tesis, Profesores Doctores Fernando Martínez Abella y Manuel Casteleiro Maldonado, a quienes agradezco su orientación, criterio, ayuda incondicional, y el aliento que supieron infundirme para la realización de este trabajo. En definitiva, mis profesores y amigos, a quienes debo mi formación como investigadora.

Los trabajos descritos en esta tesis fueron desarrollados en el marco de un Convenio de la empresa de prefabricación Norpresa con la Fundación de la Ingeniería Civil de Galicia, y del Proyecto de Investigación XUGA22801A97, “Estudio experimental del anclaje de armaduras pretensas en hormigones de altas prestaciones”, concedido a la Universidad de La Coruña.

Mi agradecimiento se dirige de forma especial a la empresa Corporación Noroeste, y de forma especial a D. Humberto Vázquez, D. Arturo Martínez, D. Marcos Fernández y D. Gonzalo Roibás por el apoyo formativo, tecnológico y humano prestado. Ellos han puesto a nuestra disposición el conocimiento y los equipos de la empresa de prefabricados pretensados de Outeiro de Rei y del Laboratorio de Cementos Cosmos, en Oural, donde se han realizado parte de los ensayos descritos en este documento.

Asimismo, también deseo manifestar mi reconocimiento a todo el personal del Laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, y al Centro de Investigación en Edificación e Ingeniería Civil (CITEEC) de la Universidad de La Coruña, por haber facilitado los equipos y el lugar de desarrollo de los ensayos. Especial mención merecen el Profesor y Técnico del CITEEC D. Juan Ramón Rabuñal, por la inestimable colaboración en el diseño y puesta en funcionamiento de los sistemas de instrumentación electrónica, y los Técnicos D<sup>a</sup>. María J. Recarey y D. Gonzalo Álvarez, por su profesionalidad e ilusión en el desarrollo de los ensayos.

Deseo hacer constar el apoyo de mis compañeros del Área de Ingeniería de la Construcción para compaginar las obligaciones docentes y la organización de los ensayos, ánimo que también encontré en mis compañeros de la Escuela y del Departamento de Tecnología de la Construcción, y en el personal de la Biblioteca de la Escuela. Asimismo agradezco la ayuda prestada por el Departamento de Tecnología de la Información y de las Comunicaciones, y el Laboratorio de Imagen Radiológica, IMEDIR, de la Universidad de La Coruña. En cuanto a la edición y presentación deseo dejar constancia del esfuerzo realizado por D<sup>a</sup>. Manuela González.

Y, en la distancia, no dejo de recordar a mis profesores de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander, especialmente al Profesor Doctor José Antonio Rodríguez, mi director del proyecto de fin de carrera, quien supo despertar en mí el interés por la actividad investigadora implícita en la formación universitaria.

A mi marido y compañero de profesión, Javier Rodríguez, le agradezco su colaboración, consejos, ánimo y comprensión durante los años de realización de esta Tesis. A la Doctora Araceli Herrero, mi madre, cuya labor subyace en estas páginas, le agradezco su constante ayuda.

A todos, mi respeto, afecto y reconocimiento.

## RESUMEN

La adherencia entre el hormigón pretensado y la armadura pretesa es necesaria por dos motivos fundamentales. Por una parte garantiza la transmisión de la fuerza de pretensado, y por otra permite que el tendón alcance su tensión de trabajo bajo la actuación de cargas exteriores. Esta investigación se centra en el estudio de las propiedades adherentes de la zona de anclaje de los cordones de pretensado de 15.2 mm de diámetro nominal.

Actualmente la adherencia es un tema a debate debido a los resultados obtenidos en investigaciones desarrolladas desde finales de los años ochenta, que han puesto en duda los niveles de seguridad que aparentemente ofrecían diversas normativas internacionales. Por otra parte, la aparición de armaduras no metálicas y el creciente uso de hormigones de distintas prestaciones hacen necesario revisar tanto las propiedades básicas de la adherencia como las normativas de diseño y cálculo de las zonas de anclaje.

El presente documento resume la investigación llevada a cabo con los siguientes objetivos:

- Plantear las bases de un método de ensayo representativo, sistemático y económico, que permita evaluar la capacidad adherente de los elementos prefabricados pretensados de armadura pretesa, constituida por cordones de pretensado de 15.2 mm de diámetro. Los ensayos planteados tienen como finalidad la evaluación de la capacidad adherente, relativa a la transmisión de la fuerza de pretensado, y al comportamiento en servicio. Actualmente existe un vacío normativo al respecto.
- Efectuar la calibración de los ensayos planteados a escala, con auténticos elementos pretensados fabricados al efecto, para diversos tipos de hormigón de altas prestaciones iniciales.
- Evaluar la viabilidad desde el punto de vista de la adherencia de producir vigas pretensadas de armadura pretesa con cordones de 15.2 mm de diámetro que, con menor peso propio, presenten un comportamiento en servicio y una capacidad resistente similar a las vigas pretensadas convencionales.

Para ello se plantean varias dosificaciones de hormigón ligero, con árido ligero consistente en arcilla expandida. El resto de los componentes del hormigón coinciden con los de un hormigón convencional de referencia, cuya dosificación se emplea habitualmente en una empresa de prefabricados. Todo el estudio se realiza de forma comparativa, evaluando las diferentes propiedades de los hormigones ligeros ensayados, respecto a las del hormigón convencional de referencia. Durante la investigación se hacen una serie de ensayos, con objeto de analizar la capacidad adherente hormigón/acero, que se resumen a continuación:

- Ensayos de adherencia en probeta. Se desarrollaron los equipos necesarios, y los procedimientos de dos ensayos tipo de adherencia, efectuados en probetas cilíndricas. Estos ensayos se denominan en este documento ensayos de pósito, y sirven para caracterizar el comportamiento adherente de las armaduras activas y pasivas.
  - El primero de los ensayos simula el comportamiento de la zona de transmisión de los elementos pretensados. Se trata de un ensayo tipo “push-in”, que se realiza a partir de un cordón de pretensado previamente tesado, con la tensión máxima permitida de forma permanente por la EHE (EHE98). Durante el ensayo se simula la transferencia gradual de la fuerza de pretensado en la probeta, hormigonada posteriormente al tesado.
  - También se desarrolló un procedimiento de ensayo para evaluar el comportamiento en servicio de las vigas pretensadas, durante la cual aumenta la tensión del pretensado debido a la sollicitación externa. Se trata de un ensayo tipo “pull-out”, que se realiza a



partir de un cordón de pretensado previamente tesado a una carga que pretende reproducir la fuerza de pretensado tras las pérdidas, en un cierto instante durante la vida útil. Durante el ensayo se simula el aumento de tensión que tiene lugar en la armadura activa traccionada, durante la puesta en carga de la viga.

- Realización e instrumentación de elementos pretensados de 3.75 m de longitud, de sección transversal cuadrada, con un sólo cordón de pretensado de 15.2 mm de diámetro, centrado en la sección. Este ensayo permite el estudio del proceso y la forma de transmisión del pretensado durante la transferencia. También permite analizar la sensibilidad de los elementos pretensados a la fisuración por tensiones transversales excesivas, en función de la tensión de tesado, el recubrimiento adoptado, ... Se desarrolla un nuevo procedimiento para estimar la longitud de transmisión, a partir de las deformaciones medidas en los paramentos laterales de las vigas pretensadas. En este método se adoptan dos hipótesis de crecimiento de la deformación del hormigón a lo largo de la longitud de transferencia: ley lineal (enfoque habitual) y ley exponencial (que constituye la solución de la ecuación diferencial de la adherencia según determinadas hipótesis).
- Fabricación e instrumentación de vigas pretensadas de pretensado excéntrico, de 9 metros de longitud, sección rectangular 20×40 cm, y pretensado compuesto de tres cordones inferiores alineados en horizontal, y uno superior. Las variables son la armadura de confinamiento y el tipo de material. Se adoptan los valores de recubrimiento y separación entre cordones habituales en la empresa de grandes prefabricados. Durante la fabricación se instrumentan los valores de la fuerza de pretensado en anclajes, la deformación del hormigón en los paramentos laterales, la deformación del pretensado, y el deslizamiento relativo pretensado/hormigón durante la transferencia. Se evalúan los valores de longitud de transmisión inmediatamente tras la transferencia, y posteriormente de forma periódica.
- Parte de las vigas fabricadas se ensayan a flexión, para evaluar la capacidad resistente y acotar la longitud de anclaje. A partir de la instrumentación dispuesta durante la fabricación se obtiene el comportamiento experimental de las vigas hasta carga máxima. De esta forma se puede comparar los resultados de los ensayos con las predicciones teóricas, lo que posibilita efectuar el diagnóstico de la forma de rotura de las vigas ensayadas y, consecuentemente, la acotación de la zona de anclaje.

## **PALABRAS CLAVE**

**Hormigón pretensado, prefabricados, hormigón ligero, hormigón semiligero, adherencia, anclaje, cordón de pretensado, pretensado, altas prestaciones, alta resistencia, vigas pretensadas, vigas prefabricadas, pull-out, push-in, ensayos, arcilla expandida, áridos, hendidamiento, fisuración.**

## SUMMARY

Bond of pretensioned prestressed concrete and prestressing shows in two different ways: it is responsible of the transmission of the prestressing force along pretensioned elements; on the other hand, it allows strands to increase their tension up to their working. This research has been focused on 15.2 mm nominal diameter strand bond.

Nowadays strand bond is being discussed, due to the striking results obtained in several research projects carried out in the late eighties, which have posed doubts on the safety of several international code bond formulations. The increasing research in non-metallic reinforcement, and the rising use of different performance concrete batches demand a revision of both basic bond properties and design rules of anchorage zones.

This document presents the summary of the work undertaken with the following aims:

- To set the basis of a representative, systematic and economic test method, which enables the evaluation of bond capacity in pretensioned prestressed elements, reinforced with 15.2 mm diameter prestressed strands. The purpose of the tests presented herein is the evaluation of bond capacity, both along the transmission length and the flexural bond length.
- To adjust these tests methods to the results obtained from scaled great prestressed elements, produced with this purpose, made from several high performance concrete types.
- To assess the feasibility of producing pretensioned prestressed lightweight concrete beams, with a considerable weight saving, showing a similar behavior through service loads and a flexural resistance like those of normalweight concrete.

So several batches consisting of lightweight aggregates concrete from expanded clay are developed. The rest of the components are those of a conventional normal weight concrete, used in regular prestressed concrete elements production, which act as a reference throughout this research. This study is carried out in a comparative way: the properties of the new mixes are contrasted with those of the normalweight concrete. Several different tests are performed to analyze prestress bond properties:

- Bond tests on cylindrical specimens. The necessary devices and procedures are developed for two test types. These in this document so called “grantry bond tests” were built-up to analyze bond behaviour of bth prestressing and untensioned reinforcement.
  - Bond tests were made on standard specimens, to simulate the behavior along the transfer zone. This process consists of a “push-in” test, carried out on a prestressed strand fulfilling the maximum stress requirements established by the EHE. (EHE98). A gradual transfer of prestress is simulated, on a hardened specimen which has been batched after prestressing of the strand.
  - Another test was developed to evaluate the behavior of beams through service life, when prestressing force increases due to loading in the so called “flexural bond length”. It is a “pull-out” test, performed on a specimen reinforced with a strand, which has been tensioned before batching. Stress level corresponds to the prestressing force after losses, in a certain moment of the service life. During the test force increase along flexural bond length is simulated.
- Production and testing of prestressed concrete elements, consisting of square cross section elements prestressed with a centered 15.2 mm diameter strand (referred to as prestressed concrete prisms in this document). This test allows the study of the transfer process through time and along the distance from the end of the element. It also makes possible sensitivity



analysis of prestressed elements with respect to longitudinal cracking caused by splitting and bursting stresses in the anchorage. Available variables are level of tension of the strand, cover, ... A new process is developed to measure transmission length from experimental strain measures taken on the prisms side faces. Two different procedures are developed, based on different hypotheses: linear strains law along the transfer length, and exponential strains law along the end of the elements (which is the solution of the differential equation under certain hypothesis).

- Scaled prestressed concrete beams were produced and tested. Prestressing consisted of three inferior horizontally aligned strands and an upper strand. Variables are confinement reinforcement ratio and concrete type. Cover of strands and spacing between them were those adopted in a precast prestressed concrete beams plant. During production anchorage forces were measured from load cells placed in the prestressing bed anchorage, and also through strain measures in the side faces of elements and strands. Relative displacements of strands vs. concrete during transfer process were also calculated. Transmission length is evaluated using both linear and exponential methods soon after transfer, and regularly afterwards.
- A number of beams are tested to evaluate flexural resistance and to establish development length boundaries. Through the instrumentation placed during production, experimental behavior of beams is characterized till maximum load. Thus experimental results can be compared with theoretical predictions, which allow to distinguish the modes of failure of tested beams, and enable to get development length upper boundaries.

## **KEY WORDS**

**Prestressed concrete, precast concrete, concrete, lightweight, semi-lightweight, bond, bonding, anchorage, strand, pre-tensioning, pretensioning, pre-tensioned, pretensioned, high performance, high strength, ductility, prestressed, beam/s, pull-out, push-in, testing, expanded clay, aggregates, splitting, cracking.**



# ÍNDICE

## Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES .....	1.1
1.2. LA ADHERENCIA DE LA ARMADURA PRETESA .....	1.2
1.3. ANTECEDENTES HISTÓRICOS .....	1.4
1.4. OBJETIVOS GENERALES DE ESTA TESIS .....	1.7
1.5. CONTENIDO DE ESTE DOCUMENTO .....	1.7

## Capítulo 2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1. INTRODUCCIÓN .....	2.1
2.2. INVESTIGACIONES PREVIAS .....	2.2
2.3. HORMIGÓN LIGERO .....	2.10
2.3.1. REALIZACIONES DE VIGAS PRETENSADAS DE HORMIGÓN LIGERO .....	2.11
2.3.2. PROPIEDADES GENERALES DE LOS HORMIGONES LIGEROS ESTRUCTURALES .....	2.12
2.3.2.1. Características del árido ligero .....	2.12
2.3.2.2. Comportamiento tenso-deformacional .....	2.14
2.3.2.3. Durabilidad del hormigón ligero .....	2.16
2.3.2.4. Resumen de las propiedades del hormigón ligero. Criterios de armado .....	2.16
2.3.3. COMPORTAMIENTO A TRACCIÓN .....	2.17
2.3.3.1. Evans y Marathe (1968) .....	2.17
2.3.3.2. Al-Kubaisy y Young (1975) .....	2.17
2.3.3.3. Lydon y Balendran (1980) .....	2.18
2.3.3.4. Fouré (1985) .....	2.19
2.4. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA ADHERENCIA .....	2.20
2.4.1. ENSAYOS DE ADHERENCIA REALIZADOS EN PROBETA .....	2.21
2.4.1.1. Tulin y Al-Chalabi (1969) .....	2.21
2.4.1.2. Tilanterä y Rechart (1977) .....	2.22
2.4.1.3. Brearley y Johnston (1990) .....	2.23
2.4.1.4. Abrishami y Mitchell (1993) .....	2.24
2.4.1.5. Rose y Russell (1997) .....	2.29
2.4.1.6. Sharaf (1999) .....	2.30
2.4.2. INVESTIGACIÓN SOBRE LA LONGITUD DE TRANSMISIÓN EN VIGA .....	2.31
2.4.2.1. Chandler (1990) .....	2.32
2.4.2.2. Nanni, Tanigaki y Koichi (1992) .....	2.34
2.4.2.3. Lane (1992) .....	2.35
2.4.2.4. Shahawy, Issa, Batchelor y Barrington (1992) .....	2.36
2.4.2.5. Abendroth, Stuart y Yuan (1997) .....	2.37
2.4.2.6. Russell y Burns (1997) .....	2.39
2.4.3. INVESTIGACIÓN SOBRE LA LONGITUD DE ANCLAJE EN VIGAS .....	2.40
2.4.3.1. Chew Chong Key (Tesis Doctoral, 1991) .....	2.40

2.4.3.2.	Mitchell, Cook, Khan y Tham (1993) .....	2.44
2.4.3.3.	Cousins, Stallings y Simmons (1995) .....	2.48
2.4.3.4.	Deatherage, Burdette y Chew (1994) .....	2.49
2.4.3.5.	FHWA (1994) .....	2.50
2.4.3.6.	Mahmoud, Rizcalla y Zaghloul (1999) .....	2.50
2.4.3.7.	Lu, Boothby, Bakis y Nanni (2000) .....	2.52
2.4.4.	OTRAS INVESTIGACIONES .....	2.52
2.4.4.1.	Green, Cookson y Johnson (1984) .....	2.52
2.4.4.2.	Kannel, French y Stolarski (1997) .....	2.54
2.4.4.3.	Zobel y Jirsa (1998) .....	2.55
2.4.5.	MÉTODOS NUMÉRICOS .....	2.56
2.4.5.1.	Fujii y Takeshi (1972) .....	2.56
2.4.5.2.	Sarles e Itani (1984) .....	2.59
2.4.5.3.	Abrishami y Mitchell (1996) .....	2.61
2.4.6.	FACTORES ANALIZADOS EN LA BIBLIOGRAFÍA QUE AFECTAN A LA ADHERENCIA .....	2.65
2.5.	NORMATIVAS Y RECOMENDACIONES .....	2.67
2.5.1.	PLANTEAMIENTO DE LAS DIVERSAS NORMATIVAS Y RECOMENDACIONES .....	2.67
2.5.1.1.	CEB-FIP CM 1990 .....	2.67
2.5.1.2.	Eurocódigo 2, UNE-ENV 1991-1-1, UNE-ENV 1992-1-3 y UNE-ENV 1992-1-4 .....	2.73
2.5.1.3.	EHE: Instrucción de Hormigón Estructural .....	2.76
2.5.1.4.	ACI 318-99 .....	2.80
2.5.1.5.	PCI Design Book .....	2.80
2.5.2.	OTRAS EXPRESIONES DE LAS LONGITUDES DE TRANSMISIÓN Y ANCLAJE .....	2.81
2.5.3.	RESUMEN DE LOS FACTORES CONSIDERADOS POR LAS DISTINTAS NORMATIVAS .....	2.83
2.6.	CUESTIONES SIN RESOLVER .....	2.85

### Capítulo 3. PLANIFICACIÓN DE ENSAYOS Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS

3.1.	OBJETIVOS PARTICULARES DE ESTA INVESTIGACIÓN .....	3.1
3.2.	DESARROLLO DE LOS ENSAYOS .....	3.3
3.2.1.	PRIMERA FASE DE LA INVESTIGACIÓN .....	3.3
3.2.2.	SEGUNDA FASE DE LA INVESTIGACIÓN .....	3.4
3.3.	VARIABLES ESTUDIADAS EN LA PRESENTE INVESTIGACIÓN .....	3.5
3.4.	NOTACIÓN Y NOMENCLATURA .....	3.7
3.5.	MAPA DE ENSAYOS .....	3.8

### Capítulo 4. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

4.1.	INTRODUCCIÓN .....	4.1
4.2.	COMPONENTES DEL HORMIGÓN .....	4.5
4.2.1.	CEMENTO .....	4.5
4.2.2.	ÁRIDOS .....	4.5
4.2.2.1.	Arena .....	4.5
4.2.2.2.	Gravilla .....	4.6
4.2.2.3.	Grava .....	4.7



4.2.2.4.	Árido ligero: arcilla expandida .....	4.8
4.2.3.	ADITIVOS EMPLEADOS .....	4.10
<b>4.3.</b>	<b>HORMIGONES .....</b>	<b>4.11</b>
4.3.1.	OBTENCIÓN DE LAS DOSIFICACIONES DE PARTIDA: HL3-1 Y HL10-1 ...	4.11
4.3.2.	OBTENCIÓN DE LAS DOSIFICACIONES MODIFICADAS HL3-2 Y HL10-2	4.14
4.3.3.	PROCEDIMIENTO DE AMASADO EN LABORATORIO .....	4.16
4.3.4.	RESUMEN DE LAS AMASADAS REALIZADAS .....	4.18
4.3.4.1.	Métodos de ensayo .....	4.18
4.3.4.2.	Resistencias a compresión a velocidad normalizada y a velocidad lenta .....	4.19
4.3.4.3.	Resumen de las amasadas realizadas .....	4.20
4.3.4.4.	Comparación entre los diversos hormigones .....	4.24
4.3.5.	RETRACCIÓN Y ENTUMECIMIENTO .....	4.24
4.3.5.1.	Introducción .....	4.24
4.3.5.2.	Ambiente en el Laboratorio de Construcción .....	4.26
4.3.5.3.	Hormigón Convencional .....	4.26
4.3.5.4.	Hormigón ligero HL10-1 .....	4.28
4.3.5.5.	Hormigón ligero HL3-1 .....	4.31
4.3.5.6.	Hormigón ligero HL10-2 .....	4.33
4.3.5.7.	Conclusiones .....	4.34
4.3.6.	DIAGRAMAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN A LA EDAD DE TRANSFERENCIA .....	4.35
4.3.6.1.	Diagramas de HL10-1 y HC, a los 2 días .....	4.36
4.3.6.2.	Diagramas de HL10-2 y HC, a los 3 días .....	4.39
4.3.7.	DENSIDAD DEL HORMIGÓN EN MASA Y AHORRO EN PESO .....	4.42
<b>4.4.</b>	<b>ACERO DE PRETENSADO .....</b>	<b>4.42</b>

## **Capítulo 5. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE ADHERENCIA SOBRE PROBETA O ENSAYOS DE PÓRTICO**

<b>5.1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>5.1</b>
<b>5.2.</b>	<b>EQUIPOS E INSTRUMENTACIÓN .....</b>	<b>5.2</b>
<b>5.3.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS REALIZADOS .....</b>	<b>5.4</b>
5.3.1.	ENSAYO DE SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ADHERENTE EN LA ZONA DE TRANSMISIÓN .....	5.6
5.3.2.	ENSAYO DE SIMULACIÓN DE COMPORTAMIENTO ADHERENTE EN LA ZONA COMPLEMENTARIA A TRACCIÓN .....	5.7
<b>5.4.</b>	<b>VALORACIÓN CRÍTICA DE LOS ENSAYOS DESCRITOS EN EL PRESENTE TRABAJO .....</b>	<b>5.9</b>

## **Capítulo 6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ADHERENCIA SOBRE PROBETA**

<b>6.1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>6.1</b>
<b>6.2.</b>	<b>ENSAYO DE SIMULACIÓN DE COMPORTAMIENTO ADHERENTE EN LA ZONA DE TRANSMISIÓN .....</b>	<b>6.6</b>
6.2.1.	INTRODUCCIÓN .....	6.6
6.2.2.	ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS LT .....	6.7
6.2.2.1.	Pórticos LT1C-2D y LT2C-2D .....	6.7
6.2.2.2.	Pórticos LT1L101-2D y LT2L101-2D .....	6.13

6.2.2.3.	Pórticos LT1L31-2D y LT2L31-2D .....	6.18
6.2.2.4.	Pórticos LT1C-3D y LT2C-3D .....	6.22
6.2.2.5.	Pórticos LT1L102-3D y LT2L102-3D .....	6.27
6.2.3.	RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS .....	6.32
<b>6.3.</b>	<b>ENSAYO DE SIMULACIÓN DE COMPORTAMIENTO ADHERENTE EN LA ZONA COMPLEMENTARIA A TRACCIÓN .....</b>	<b>6.36</b>
6.3.1.	INTRODUCCIÓN .....	6.36
6.3.2.	ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS LC .....	6.38
6.3.2.1.	Pórticos LC1LC-2D y LC2LC-2D .....	6.38
6.3.2.2.	Pórticos LC1L101-2D y LC2L101-2D .....	6.43
6.3.2.3.	Pórticos LC1L31-2D y LC2L31-2D .....	6.47
6.3.2.4.	Pórticos LC1C-3D y LC2C-3D .....	6.51
6.3.2.5.	Pórticos LC1L102-3D y LC2L102-3D .....	6.55
6.3.3.	RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS .....	6.59
<b>6.4.</b>	<b>ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS .....</b>	<b>6.63</b>
<b>6.5.</b>	<b>CONCLUSIONES PARCIALES DE LOS ENSAYOS REALIZADOS .....</b>	<b>6.65</b>
<b>6.6.</b>	<b>VALORACIÓN CRÍTICA DE LOS ENSAYOS .....</b>	<b>6.66</b>

## **Capítulo 7. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD DE TRANSMISIÓN EN PRISMAS PRETENSADOS CON PRETENSADO CENTRADO**

<b>7.1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7.1</b>
<b>7.2.</b>	<b>MONTAJE DE LA BANCADA CON LOS PÓRTICOS DE ANCLAJE .....</b>	<b>7.1</b>
<b>7.3.</b>	<b>EQUIPOS E INSTRUMENTACIÓN .....</b>	<b>7.3</b>
<b>7.4.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO .....</b>	<b>7.4</b>
<b>7.5.</b>	<b>VALORACIÓN CRÍTICA DEL ENSAYO .....</b>	<b>7.7</b>

## **Capítulo 8. ENSAYOS DE LOS PRISMAS PRETENSADOS**

<b>8.1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>8.1</b>
<b>8.2.</b>	<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA .....</b>	<b>8.3</b>
8.2.1.	Prisma P1L10-1 .....	8.5
8.2.2.	Prisma P2L10-1 .....	8.11
8.2.3.	Prisma P3L10-1 .....	8.12
8.2.4.	Prisma P1L3-1 .....	8.23
8.2.5.	Prisma P2L3-1 .....	8.29
8.2.6.	Prisma P3L3-1 .....	8.34
8.2.7.	Prisma P3C .....	8.40
8.2.8.	Prisma P4C .....	8.45
8.2.9.	RESUMEN Y CONCLUSIONES .....	8.51
8.2.9.1.	Resumen .....	8.51
8.2.9.2.	Conclusiones .....	8.53
8.2.10.	DESCRIPCIÓN DE LA FISURACIÓN OBSERVADA .....	8.54
<b>8.3.</b>	<b>ANÁLISIS DE LAS MEDIDAS DE LOS EXTENSÓMETROS MECÁNICOS .....</b>	<b>8.55</b>
8.3.1.	INTRODUCCIÓN .....	8.55
8.3.2.	Prisma P1L10-1 .....	8.57



8.3.3.	Prisma P2L10-1 .....	8.59
8.3.4.	Prisma P3L10-1 .....	8.65
8.3.5.	Prisma P1L3-1 .....	8.69
8.3.6.	Prisma P2L3-1 .....	8.69
8.3.7.	Prisma P3L3-1 .....	8.74
8.3.8.	Prisma P3C .....	8.78
8.3.9.	Prisma P4C .....	8.82
8.3.10.	RESUMEN Y CONCLUSIONES .....	8.87
8.4.	<b>ANÁLISIS DE LAS POSIBLES CAUSAS DE FISURACIÓN DE LOS PRISMAS PRETENSADOS DE HORMIGONES LIGEROS HL3-1 Y HL10-1 .....</b>	<b>8.89</b>
8.4.1.	PRINCIPALES DIFERENCIAS ENTRE LOS PRISMAS COMERCIALES Y LOS ENSAYADOS .....	8.89
8.4.2.	POSIBLES MEDIDAS PARA REDUCIR LA PROBABILIDAD DE FISURACIÓN .....	8.90
8.5.	<b>PLANTEAMIENTO DE VÍAS DE CONTINUACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN ....</b>	<b>8.92</b>
8.5.1.1.	Vía 1: Estudio de la edad de transferencia, condicionada por las propiedades diferidas del hormigón ligero: evaluación del coeficiente de cansancio a tracción .....	8.93
8.5.1.2.	Vía 2: Fabricación de elementos con más armadura de confinamiento .	8.93
8.5.1.3.	Vía 3: Planteamiento de nuevas dosificaciones .....	8.93
8.5.2.	CRITERIOS DE OBTENCIÓN DE LAS NUEVAS DOSIFICACIONES .....	8.94

## **Capítulo 9. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD DE ANCLAJE EN VIGAS PRETENSADAS**

9.1.	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>9.1</b>
9.2.	<b>DESCRIPCIÓN DE LAS VIGAS FABRICADAS .....</b>	<b>9.3</b>
9.2.1.	REQUISITOS QUE HA DE CUMPLIR LA SECCIÓN TRANSVERSAL ADOPTADA .....	9.3
9.2.2.	ALTERNATIVAS CONSIDERADAS DE SECCIÓN TRANSVERSAL .....	9.4
9.2.3.	CRITERIOS DE DISEÑO DE LAS VIGAS .....	9.4
9.2.4.	DISCUSIÓN DE LA SECCIÓN ADOPTADA. COMPARACIÓN CON ELEMENTOS REALES .....	9.8
9.2.5.	DISEÑO Y DESPIECE DE LAS VIGAS .....	9.10
9.2.5.1.	Definición de las vigas pretensadas .....	9.10
9.2.5.2.	Descripción de las vigas propuestas. Despiece de las armaduras .....	9.10
9.3.	<b>INSTRUMENTACIÓN EMPLEADA DURANTE LA FABRICACIÓN Y ENSAYO DE LAS VIGAS .....</b>	<b>9.13</b>
9.4.	<b>PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DE LAS VIGAS .....</b>	<b>9.14</b>
9.5.	<b>DETERMINACIONES REALIZADAS DURANTE LA FABRICACIÓN DE LAS VIGAS .....</b>	<b>9.15</b>
9.6.	<b>ENSAYO DE DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS VIGAS A CARGA CRECIENTE .....</b>	<b>9.17</b>
9.6.1.	INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPOS PARA EL ENSAYO A ROTURA DE LAS VIGAS .....	9.17
9.6.2.	CAPACIDAD RESISTENTE TEÓRICA DE LAS VIGAS: DIAGRAMA MOMENTO-CURVATURA DE UNA SECCIÓN CENTRAL HASTA ROTURA .....	9.19



## Capítulo 10. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LAS VIGAS

<b>10.1. INTRODUCCIÓN</b>	10.1
<b>10.2. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA: VIGAS DE LA PRIMERA SERIE</b>	10.2
10.2.1. DESCRIPCIÓN DE LAS VIGAS FABRICADAS	10.2
10.2.2. PÉRDIDAS DE PRETENSADO ANTES DE LA TRANSFERENCIA	10.5
10.2.3. PÉRDIDAS DE PRETENSADO TRAS LA TRANSFERENCIA	10.11
10.2.3.1. Viga V1L10-1: c 6 a 15	10.11
10.2.3.2. Viga V2L10-1: c 8 a 20	10.12
10.2.3.3. Viga V3L10-1: c 8 a 15	10.14
10.2.3.4. Viga V4L10-1: c 6 a 10	10.16
10.2.3.5. Viga V5L10-1: c 6 a 15	10.17
10.2.4. CONTRAFLECHAS TRAS LA TRANSFERENCIA Y DETECCIÓN DE LA FISURACIÓN	10.19
10.2.5. CONCLUSIONES	10.19
<b>10.3. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA: VIGAS DE LA SEGUNDA SERIE</b>	10.20
10.3.1. DESCRIPCIÓN DE LAS VIGAS FABRICADAS	10.20
10.3.2. PÉRDIDAS DE PRETENSADO ANTES DE LA TRANSFERENCIA	10.23
10.3.3. PÉRDIDAS DE PRETENSADO TRAS LA TRANSFERENCIA	10.26
10.3.3.1. Viga V1L10-2: c 8 a 15	10.26
10.3.3.2. Viga V2L10-2: c 8 a 15	10.27
10.3.3.3. Viga V3L10-2: c 8 a 15	10.30
10.3.3.4. Viga V4C: c 8 a 15	10.32
10.3.3.5. Viga V5C: c 8 a 15	10.34
10.3.3.6. Viga V6C: c 8 a 15	10.36
10.3.4. CONTRAFLECHAS TRAS LA TRANSFERENCIA Y DETECCIÓN DE LA FISURACIÓN	10.38
10.3.5. PENETRACIÓN DE LOS CORDONES DE PRETENSADO	10.42
10.3.6. COMPARACIÓN ENTRE LAS PÉRDIDAS DE LOS DIFERENTES MATERIALES	10.46
10.3.7. CONCLUSIONES	10.48
<b>10.4. ANÁLISIS DE LA ZONA DE TRANSMISIÓN DE PRETENSADO</b>	10.48
10.4.1. INTRODUCCIÓN	10.48
10.4.2. LONGITUD DE TRANSMISIÓN DE LAS VIGAS	10.51
10.4.3. RESUMEN DE LAS LONGITUDES DE TRANSMISIÓN OBTENIDAS	10.62
<b>10.5. PLANTEAMIENTO DE LOS ENSAYOS A FLEXIÓN DE LAS VIGAS</b>	10.64
10.5.1. CRITERIOS DE ROTURA ADOPTADOS POR LOS DIFERENTES AUTORES	10.64
10.5.2. CRITERIOS DE ROTURA ADOPTADOS EN EL PRESENTE TRABAJO	10.67
10.5.2.1. Medidas analizadas para determinar el tipo de rotura	10.67
10.5.2.2. Criterios de determinación de la forma de rotura	10.70
10.5.3. PROCEDIMIENTO DE ESTIMACIÓN DE LA FUERZA DE PRETENSADO A PARTIR DE LAS MEDIDAS DE DEFORMACIONES	10.71
<b>10.6. ANÁLISIS DE LAS VIGAS ENSAYADAS A FLEXIÓN</b>	10.77
10.6.1. ENSAYOS REALIZADOS PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD RESISTENTE A FLEXIÓN DE LAS VIGAS	10.81
10.6.1.1. Viga V6L10-1	10.84
10.6.1.2. Viga V12L10-1	10.89

10.6.1.3. Viga V10L10-1 .....	10.94
10.6.1.4. Viga V7L10-1 .....	10.100
10.6.1.5. Viga V4C .....	10.106
10.6.1.6. Viga V3L10-2 .....	10.112
10.6.2. PROCEDIMIENTO DE ACOTACIÓN DE LA LONGITUD DE ANCLAJE DE LAS VIGAS DE HORMIGÓN LIGERO .....	10.118
10.6.2.1. Longitud de anclaje prevista para el HC, según la EHE .....	10.118
10.6.2.2. Acotación de la longitud de anclaje prevista para el HL10-2 .....	10.119
10.6.3. ENSAYOS REALIZADOS PARA INTENTAR ACOTAR LA LONGITUD DE ANCLAJE .....	10.121
10.6.3.1. Viga V6C .....	10.122
10.6.3.2. Viga V1L10-2 .....	10.129
10.7. CONCLUSIONES OBTENIDAS DE LAS VIGAS ENSAYADAS .....	10.135
10.7.1. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS DATOS DE LA EXPERIMENTACIÓN .....	10.135
10.7.2. TIPOS DE ROTURA DETECTADOS .....	10.137
10.8. ACOTACIÓN DE LA LONGITUD DE ANCLAJE DEL PRETENSADO DE LOS MATERIALES ENSAYADOS .....	10.138

## Capítulo 11. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS DE LOS DIFERENTES ENSAYOS

11.1. INTRODUCCIÓN .....	11.1
11.2. MÉTODO DE ACOTACIÓN DE LA LONGITUD DE ANCLAJE .....	11.2
11.2.1. MÉTODO DE ACOTACIÓN DE LA LONGITUD DE TRANSMISIÓN.....	11.3
11.2.1.1. Determinación de la cota superior de la longitud de transmisión .....	11.4
11.2.1.2. Determinación de la cota inferior de la longitud de transmisión .....	11.5
11.2.2. MÉTODO DE ACOTACIÓN DE LA LONGITUD COMPLEMENTARIA A TRACCIÓN .....	11.6
11.2.2.1. Determinación de la cota superior de la longitud complementaria a tracción .....	11.6
11.2.2.2. Determinación de la cota inferior de la longitud complementaria a tracción .....	11.7
11.2.3. REFLEXIÓN ACERCA DE LA FISURACIÓN DIFERIDA POR HENDIMIENTO.....	11.8
11.3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PÉRDIDAS DE PRETENSADO INSTANTÁNEAS: PRISMAS Y VIGAS .....	11.11
11.4. DEDUCCIÓN DE LA LONGITUD DE TRANSMISIÓN A PARTIR DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	11.14
11.4.1. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS LINEAL Y EXPONENCIAL DE DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD DE TRANSMISIÓN.....	11.14
11.4.1.1. Comparación de la longitud de transmisión de las caras Este y Oeste en los prismas para ambos métodos .....	11.14
11.4.1.2. Comparación de los valores de $R^2$ de la zona de transmisión de los prismas para ambos métodos .....	11.17
11.4.1.3. Valoración crítica de ambos métodos: lineal y exponencial .....	11.20
11.4.2. EVOLUCIÓN DE LA LONGITUD DE TRANSMISIÓN CON EL TIEMPO (MÉTODO LINEAL).....	11.22
11.5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS EN LA ZONA DE TRANSMISIÓN .....	11.26
11.5.1. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS PRISMAS Y VIGAS.....	11.26



11.5.2. COMPARACIÓN DE LAS DIFERENTES PREDICCIONES Y LAS LONGITUDES DE TRANSMISIÓN OBTENIDAS EN TODOS LOS HORMIGONES.....	11.29
11.5.3. COMPARACIÓN DE LAS DIFERENTES PREDICCIONES Y LAS LONGITUDES DE TRANSMISIÓN OBTENIDAS EN LOS HORMIGONES LIGEROS .....	11.33
11.5.4. RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	11.35
11.6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA ZONA COMPLEMENTARIA A TRACCIÓN .....	11.35
11.7. VALORACIÓN CRÍTICA DE LA ACOTACIÓN DE LA LONGITUD DE ANCLAJE A PARTIR DEL ENSAYO DE LOS PÓRTICOS .....	11.40
11.8. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS COMPARATIVO .....	11.42

## **Capítulo 12. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS DE FUTUROS TRABAJOS**

12.1. CONCLUSIONES RELATIVAS A LAS PROPIEDADES BÁSICAS DE LOS HORMIGONES ENSAYADOS .....	12.1
12.2. CONCLUSIONES RELATIVAS AL ENSAYO DE LOS PÓRTICOS .....	12.2
12.3. CONCLUSIONES RELATIVAS AL ENSAYO DE LOS PRISMAS .....	12.3
12.4. CONCLUSIONES RELATIVAS AL ENSAYO DE LAS VIGAS .....	12.4
12.5. CONCLUSIONES RELATIVAS A LA ZONA DE TRANSMISIÓN .....	12.6
12.6. CONCLUSIONES RELATIVAS A LA ZONA COMPLEMENTARIA A TRACCIÓN .....	12.7
12.7. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LAS PREDICCIONES ANALÍTICAS Y LAS DISTINTAS NORMATIVAS .....	12.8
12.8. CONCLUSIONES RELATIVAS A LA VIABILIDAD DEL USO DEL HL EN GRANDES ELEMENTOS PREFABRICADOS PRETENSADOS .....	12.9
12.9. RECOMENDACIONES .....	12.10
12.10. PERSPECTIVAS DE FUTUROS TRABAJOS .....	12.10

Bibliografía .....	B.1
Referencias .....	R.1
Anexo 1: Notación y nomenclatura .....	A1.1
Anexo 2: Procedimiento de los ensayos de adherencia en probeta .....	A2.1
Anexo 3: Procedimiento del ensayo de los prismas .....	A3.1
Anexo 4: Análisis del tipo de transferencia .....	A4.1
Anexo 5: Método de obtención del diagrama momento-curvatura teórico. Flexocompresión recta .....	A5.1
Anexo 6: Proceso de fabricación y de ensayo de las vigas pretensadas .....	A6.1
Anexo 7: Mapas de fisuras de los prismas y las vigas .....	A7.1
Anexo 8: Documentación gráfica .....	

## Capítulo 1

# INTRODUCCIÓN

*"Ce terme nouveau de précontrainte ne désigne pas une technique déterminée caractérisée par l'emploi de certains procédés, mais une forme de pensée, une attitude d'esprit de l'ingénieur: la volonté de mettre plus de science et de conscience au service de sa fonction."*

E. Freyssinet

### 1.1. GENERALIDADES

Hasta principios de los años treinta el hormigón pretensado no constituyó una realidad aplicada, éxito que se atribuye a E. Freyssinet. Este ingeniero diseñó estructuras pretensadas, a partir de los nuevos aceros de alto límite elástico, y hormigones de alta resistencia. Si bien el concepto de pretensado data de finales del siglo XIX, hasta entonces no se había logrado garantizar la durabilidad de este tipo de estructuras, a causa del desconocimiento de las propiedades diferidas del hormigón y del pretensado.

El pretensado se puede introducir de muy diversas formas en una estructura, si bien las técnicas de armadura postesa y armadura pretesa son las que prevalecen en la actualidad. En la primera el anclaje del pretensado se consigue mediante dispositivos mecánicos, mientras que en la segunda se confía a la adherencia entre el hormigón y la armadura activa la transferencia de la fuerza de pretensado. En este último caso, la zona en la que se produce el fenómeno de la transmisión del pretensado está sometida a distribuciones de tensión y deformación complejas y no completamente conocidas, que exigen un diseño muy cuidadoso.

Así como en el hormigón pretensado de armadura postesa el tesado se realiza apoyándonos en el mismo hormigón endurecido, en armadura pretesa el tesado se realiza contra una estructura independiente: la bancada o mesa de pretensado. Hasta después del endurecimiento del hormigón, cuando éste presenta unas propiedades resistentes mínimas no se produce la transferencia del pretensado.

La adherencia en hormigón pretensado con armadura pretesa, cuestión en la que nos vamos a centrar, se manifiesta de dos formas diferentes. Por una parte es la responsable de garantizar la transmisión de la fuerza de pretensado. Por otra, durante el período de servicio de la estructura los tendones experimentan un aumento de su tensión debido al gradiente de momentos flectores y a la fisuración tensional originados por la actuación de las acciones exteriores. Aquí también el papel de la adherencia es crucial para asegurar la capacidad resistente de la estructura, garantizando el correcto anclaje de las armaduras activas.



Por todo esto es fundamental el estudio de la distribución de la tensión de adherencia a lo largo del elemento pretensado, tanto de su magnitud como de la longitud a lo largo de la cual se desarrolla (zona de anclaje), dado que el correcto funcionamiento estructural está condicionado por este fenómeno.

La característica intrínseca a los elementos prefabricados es el transporte y conexión al resto de la estructura. Cuando los elementos prefabricados tienen grandes dimensiones el manejo, transporte, y elevación implica el empleo de medios auxiliares costosos, condicionado a su disponibilidad. Un ahorro en el peso propio de las grandes vigas prefabricadas ampliaría el campo de aplicación de estas estructuras, posibilitando mayores luces para un mismo peso. Por otra parte, manteniendo las dimensiones de estos elementos, gracias a la disminución del peso propio se facilitaría el transporte y montaje de elementos, con el consiguiente ahorro, y se reducirían además las cargas actuantes durante la vida útil.

Los hormigones de altas prestaciones iniciales presentan unas propiedades que les hacen adecuados para la fabricación de elementos pretensados de armadura pretesa, ya que posibilitan la transferencia a temprana edad, fundamental para aumentar la productividad y reducir los plazos de fabricación. La investigación realizada que aquí se resume, relativa a las propiedades adherentes de diversos hormigones de altas prestaciones iniciales surgió como un intento de resolver la siguiente cuestión: ¿Es viable construir elementos pretensados de armadura pretesa a partir de hormigones ligeros, que tengan una capacidad portante similar a la de los elementos fabricados a partir de hormigones convencionales? ¿Qué propiedades han de cumplir estos hormigones ligeros, y cuáles han de ser los criterios de diseño para este material?

Los hormigones ligeros no están contemplados en la normativa española, que entiende como tales los de densidad comprendida entre 1200 y 2000  $\text{kp/m}^3$ . En el Eurocódigo se definen los hormigones ligeros de estructura cerrada, a los hormigones dosificados y compactados de forma que no se retenga una cantidad apreciable de aire ocluido, a no ser que éste se haya introducido voluntariamente, y con una densidad seca no superior a 2000  $\text{kp/m}^3$ . Las dosificaciones de hormigón ligero de esta investigación se han planteado en esta línea.

## 1.2. LA ADHERENCIA DE LA ARMADURA PRETESA

En febrero de 1998 se publicó en la revista PCI Journal un resumen de las propiedades adherentes de los cordones de pretensado en el que se definen:

- **Longitud de transmisión (o también de transferencia)**, como la distancia entre el extremo de la viga y la zona en la que el pretensado se ha transferido por adherencia y rozamiento entre el pretensado y el hormigón. A la fuerza de pretensado transferida se le denomina pretensado efectivo.
- **Longitud de anclaje** a la necesaria para que el pretensado desarrolle la tensión correspondiente a la capacidad nominal a flexión de la viga. Esta tracción no ha de ser necesariamente la tensión máxima del acero de pretensado (véanse las Figuras 1.2-1 y 1.2-2).



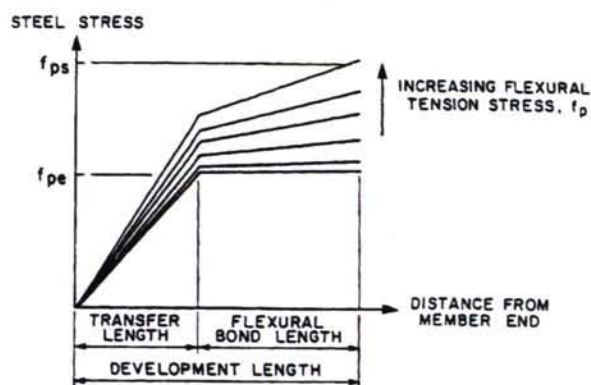
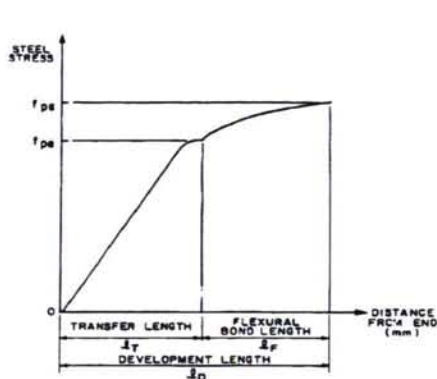


Figura 1.2-1: Longitud de anclaje (WEER91)    Figura 1.2-2: Evolución de las tensiones de pretensado en ensayo a tracción (WEER91)

El objeto de este resumen era proporcionar a los proyectistas criterios de diseño de la zona de anclaje, dada la dispersión de resultados proporcionados por las diversas investigaciones sobre el tema; dispersión equiparable a la que presenta el módulo de deformación u otras propiedades del hormigón<sup>1.1</sup>.

En la presente investigación se ha convenido en denominar a la longitud complementaria a la longitud de transmisión ("flexural bond length") longitud complementaria a tracción. De ahora en adelante emplearemos esta nomenclatura.

Por otra parte, el Código Modelo define la longitud de desarrollo (también denominada longitud de dispersión), como la distancia desde la cara final de la pieza hasta la sección de hormigón a partir de la cual la distribución de tensiones dentro de la sección se puede considerar lineal. La longitud de desarrollo está comprendida dentro de la longitud de anclaje, por lo que en parte de la zona de anclaje se produce el efecto Saint-Venant.

Para el estudio de las propiedades adherentes cada una de las zonas anteriormente definidas, en investigaciones previas se han realizado diversos ensayos, que se pueden clasificar en:

- Ensayos de adherencia en probeta. Dentro de este grupo se diferencian dos tipos:
  - Ensayos de "pull-out". Se procede al hormigonado de una probeta alrededor del alambre o cordón de pretensado, y tras el endurecimiento, cuando el hormigón alcanza unas determinadas propiedades resistentes, se aplica una tracción creciente sobre el pretensado en un extremo de la probeta, hasta que se alcanza la rotura por hendimiento de la probeta o el deslizamiento generalizado. Estos ensayos se diferencian según la armadura haya sido previamente tesada al proceso de hormigonado, o no. La diferencia de carga en ambos extremos de la probeta, y el deslizamiento registrado en cada momento determinan la adherencia.
  - Ensayos tipo "push-in", de proceso análogo al anterior, excepto en que la fuerza aplicada tiene sentido contrario, hacia el interior de la probeta. En este ensayo la armadura activa ha sido tesada antes del hormigonado. Este tipo de ensayo permite simular el comportamiento adherente de la zona de transmisión.

<sup>1.1</sup> PCI Journal, enero-febrero de 1998.

- Fabricación de elementos pretensados a escala: tras el tesado de la armadura activa en la bancada, se procede al hormigonado. De esta forma se simula el proceso de fabricación de un elemento pretensado. Tras el proceso de curado y endurecimiento, se transfiere el pretensado de forma gradual o súbita, según el método que se pretenda simular. Este tipo de ensayos se diferencian según:
  - El cordón/cordones de pretensado esté centrado dentro de la sección transversal. Este tipo de elementos posibilita el estudio del proceso de la transferencia, y de la evolución de la longitud de transmisión.
  - El pretensado presente una cierta excentricidad. Además del estudio de la longitud de transmisión, este tipo de elementos posibilita el estudio del comportamiento a carga creciente hasta rotura.

### 1.3. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

La adherencia entre el tendón de pretensado y el hormigón depende de las tensiones y deformaciones que se producen en la interfase entre ambos: la magnitud de las mismas depende de las propiedades geométricas y de los materiales. La tendencia general ha estado encaminada a establecer fórmulas para predecir la longitud de transmisión, basadas en relaciones entre las propiedades geométricas del acero, y las propiedades del hormigón.

El modo en que va aumentando la fuerza de pretensado a lo largo de la pieza determina en una estructura pretensada la proporción en que pueden aumentar los esfuerzos desde el extremo del elemento, y por lo tanto, la capacidad resistente de la estructura. Para evitar la aparición de fisuras longitudinales en la zona de anclaje de la fuerza de pretensado, que constituyan una vía de entrada potencial a los agentes agresivos, se hace preciso un conocimiento profundo del fenómeno de la adherencia. La importancia del comportamiento adherente adquiere especial relevancia en casos como:

- Elementos sometidos a acciones dinámicas.
- Elementos pretensados a los que se va a dar continuidad.
- Elementos que presenten momentos flectores elevados en las zonas extremas, por ejemplo traviesas de ferrocarril, jácenas cortas pretensadas, cimentaciones pretensadas, para los cuales es necesario garantizar una adecuada resistencia adherente.
- Estructuras con pretensado parcial, para las cuales se admite un cierto grado de fisuración en servicio, lo que podría producir una disminución de la adherencia con el tiempo.

Aun cuando el estudio de la adherencia data de los comienzos del pretensado, se puede fijar el inicio de las investigaciones de adherencia más relevantes a finales de los años treinta, a cargo de Hoyer y Friedrich (1939). En la década de los cuarenta Armstrong (1949) y Marshall (1949) estudiaron los efectos de las características geométricas del tendón de pretensado sobre la adherencia, y concluyeron que la adherencia está relacionada con el diámetro del cable, la rugosidad superficial y la forma del tendón. Las investigaciones se realizaron con alambres de pequeño diámetro.



En los años siguientes el pretensado experimentó una rápida difusión en Norteamérica y Europa. Consecuentemente se extendió el uso de tendones de tamaño diverso, si bien la tendencia, por motivos económicos, fue hacia unidades más potentes. De entre los trabajos realizados en este período destacan los de Janney (1954), Evans y Robinson (1955), Base (1957), Faulkes (1958). En el Capítulo 2 se aborda un resumen de estas investigaciones. A finales de los años cincuenta y principios de los sesenta, la PCA (Portland Cement Association) realizó dos campañas de ensayos, a cargo de Hanson y Kaar (1959), y a cargo de Kaar, LaFraugh y Mass (1963). A raíz de estos ensayos aparentemente se produjo un consenso acerca de las propiedades que afectan el fenómeno de la adherencia: propiedades del acero como diámetro, nivel de carga, características superficiales, forma del tendón; propiedades del hormigón como resistencia, recubrimientos, propiedades diferidas (retracción y fluencia).

Históricamente la investigación se ha centrado más en la longitud de transmisión, que en la longitud de anclaje, exceptuando algunos investigadores: Janney (1954), Hanson y Kaar (1959), Chew Chong Key (1991), Mitchell et al. (1993), Cousins et al. (1986, 1994), Deatherage et al. (1994), ...

Cabe destacar que las fórmulas de la normativa americana (ACI y AASHTO), vigentes desde los años sesenta, fueron deducidas por Hanson y Kaar a finales de los años cincuenta, a partir de ensayos realizados con cordones de pretensado de hasta 0.5" de diámetro. La tensión máxima del pretensado tras la transferencia fue del setenta por ciento de la tensión máxima del cordón de pretensado, que en aquellas fechas presentaba una carga unitaria máxima de 1720 MPa.

En la actualidad está extendido el uso de cordones de pretensado de 15.2 mm (antes 0.6") y de 16 mm de diámetro, sometidos a tensiones máximas tras el tesado del setenta y cinco por ciento de la tensión máxima del cordón, siendo la carga unitaria máxima de 1860 MPa. Para estos cordones son de aplicación las fórmulas experimentales de la normativa ACI, si bien las características de los cordones de pretensado y las condiciones de tesado para las que fueron deducidas, como acabamos de exponer, son diferentes.

A mediados de los ochenta se realizó en Norteamérica una campaña de ensayos que culminó en un informe<sup>1,2</sup> en el cual se cuestionaba la validez de las fórmulas de las longitudes de transmisión y de anclaje, dado que se habían obtenido resultados experimentales que proporcionaban valores de estos parámetros superiores a los predichos por la normativa vigente. Como resultado de la preocupación originada en la industria de la prefabricación la FHWA (Federal Highway Administration) editó un memorándum incluyendo una serie de restricciones:

- Se prohibía el uso de cordones de pretensado de 0.6".
- La distancia mínima entre centros de cordones se elevaba a cuatro diámetros.
- Se recomendaba multiplicar por 1.6 los valores de longitud de anclaje para cordones adherentes resultantes de la fórmula de la AASHTO.

---

<sup>1,2</sup> Cousins, T.E.; Johnston, D.W.; Zia, P.; "Bond of Epoxy Coated Prestressing Strand", Publication No. FHWA/NC/87-005, Federal Highway Administration, Washington, DC, December, 1986.



- En el caso de cordones no adherentes en los extremos la longitud de anclaje que se prescribía era el doble de la obtenida mediante la fórmula de la AASHTO.

Estas restricciones se tomaron como medida provisional, mientras no se obtuviesen resultados experimentales en sentido contrario, y estos se tuviesen en cuenta en la normativa de la AASHTO. Estas disposiciones transitorias tuvieron una incidencia económica severa en el sector de la prefabricación. En algunos casos, los proyectos de estructuras prefabricadas se rediseñaron con materiales alternativos. A consecuencia de estos hechos, se puso en evidencia la necesidad de reabrir las investigaciones de las propiedades de adherencia.

Esto ha conducido a un gran número de investigaciones recientes en el campo de la adherencia del hormigón pretensado, realizadas en varios laboratorios de Estados Unidos y Canadá y coordinadas por la Federal Highway Administration, cuyos resultados actuales se resumen en el Capítulo 2.

Durante la segunda mitad de los noventa, como resultado de estas investigaciones la controversia sobre la adherencia se ha avivado. Cabe destacar la búsqueda por parte de investigadores norteamericanos de ensayos normalizados para evaluar las propiedades adherentes de la zona de transmisión de forma representativa en laboratorio, contrastando ensayos de “pull-out” sobre cordones sin tensión (PCI96a, PCI96b), ensayos de “pull-out” con tensión inicial (DENU91, ABRI93) y realización de prismas pretensados en bancadas de laboratorio (ROSE97), sin que hasta la fecha se hayan obtenido resultados concluyentes. Cabe destacar la ausencia de publicaciones recientes sobre adherencia del pretensado en Europa, y más concretamente, en España.

Respecto a las realizaciones de grandes elementos prefabricados de armadura pretesa, en la bibliografía se hace referencia a puentes de carretera de vigas prefabricadas ligeras con cordones pretensados, como por ejemplo:

- En el PCI aparecen tabuladas vigas prefabricadas pretensadas, con cordones de 0.5” de diámetro (PCI96b). Estos cordones presentan una capacidad un 40% menor que la de los cordones de 15.2 mm (PCID99).
- En los años ochenta, se fabricaron en Finlandia vigas de hormigón ligero, con árido ligero fabricado a partir de la aglomeración de cenizas volantes (TANS80).
- En Holanda, se fabricaron varios puentes de vigas prefabricadas pretensadas ligeras. Durante la construcción hay referencias de que hubo incidencias debido a fisuración por hendimiento y exfoliación. En esa época se pensó que la causa era la deficiente ejecución. Según testimonios, actualmente estas vigas no presentan problemas de durabilidad<sup>1.3</sup>.

A pesar de las ventajas evidentes de este tipo de elementos, las referencias encontradas son escasas y relativamente antiguas. Por otra parte, ni en América ni en Europa se ha hecho extensivo el uso de estos elementos.

---

<sup>1.3</sup> Según comunicación personal de Dr. J. Walrawen.



## 1.4. OBJETIVOS GENERALES DE ESTA TESIS

Actualmente la normativa española no contempla un procedimiento experimental de la evaluación de la adherencia entre los cordones de pretensado y el hormigón. La investigación desarrollada se orientó al estudio de la adherencia en armadura pretesa, con los siguientes objetivos:

- Profundizar en el conocimiento de los factores que condicionan la adherencia, y de la forma en que ésta se manifiesta en elementos pretensados de armadura pretesa.
- Plantear las bases de un método de ensayo representativo, sistemático y económico, que permita evaluar la capacidad adherente de los elementos prefabricados pretensados de armadura pretesa. La finalidad de estos ensayos es la evaluación de la capacidad adherente en la zona de transmisión y en la de anclaje de la fuerza de pretensado, así como el estudio del comportamiento hasta rotura. Estos ensayos deben permitir el estudio de los diferentes factores que influyen en la adherencia: tipo de armadura activa, tipo de hormigón, tensión de tesado, existencia y cuantía de armadura de confinamiento, recubrimiento de la armadura, ... De esta forma se podría cuantificar la influencia de determinado tipo de variables, cuyos efectos se conocen hasta ahora de forma cualitativa.
- Efectuar la calibración de los ensayos planteados a escala, con auténticos elementos pretensados fabricados al efecto, para diversos tipos de hormigones de altas prestaciones iniciales. Ensayando estos elementos a carga creciente se podrá caracterizar la influencia del tipo de material en el comportamiento hasta rotura.
- Evaluar la viabilidad de producir vigas pretensadas de armadura pretesa que, con menor peso propio, presenten un comportamiento en servicio y una capacidad resistente similar a las vigas pretensadas convencionales. Las dosificaciones de partida de los hormigones ligeros han sido obtenidas buscando unas propiedades resistentes equiparables a las de un hormigón convencional de referencia, de altas prestaciones iniciales. Como requisito adicional se estableció que la docilidad del hormigón en el momento de la colocación fuese similar a la del hormigón convencional.
- Acotar los valores de las longitudes de transmisión y anclaje de los hormigones ensayados, a fin de determinar la capacidad resistente de la zona de anclaje y de la zona central.

El estudio de la adherencia de estos hormigones se estudió con relación a una armadura activa consistente en cordones de pretensado de 15.2 mm de diámetro nominal, acero Y 1860 S7, procedente de una misma partida (rollo) a lo largo de todos los ensayos.

## 1.5. CONTENIDO DE ESTE DOCUMENTO

En el Capítulo 2 se presenta una revisión del estado del conocimiento, relativo a las investigaciones realizadas sobre las propiedades de los hormigones ligeros estructurales de altas prestaciones, y sobre las propiedades de adherencia de elementos pretensados:



estudios sobre la longitud de transmisión en elementos pretensados, ensayos a nivel de probeta con armadura pretesa, y ensayos realizados sobre elementos estructurales a escala (fabricación y ensayo a rotura) para el estudio de la zona de anclaje.

A continuación, en el Capítulo 3 se definen los objetivos específicos de esta tesis. En él se detalla la planificación y el hilo conductor de las diferentes fases del trabajo desarrollado. Se definen además los ensayos llevados a cabo, especificando las variables de esta investigación y la nomenclatura empleada en este documento.

En el Capítulo 4 se presentan las dosificaciones empleadas en la presente investigación, y los criterios que condujeron a su adopción. Se detallan los resultados obtenidos del comportamiento en fresco y en estado endurecido, relativos a capacidades resistentes y a deformaciones diferidas no tensionales. Se realiza un estudio de las densidades obtenidas en los diferentes materiales, comparativamente al hormigón convencional de referencia, para evaluar el ahorro en peso del hormigón ligero. Finalmente se resumen las principales propiedades de los hormigones estudiados.

Seguidamente, en el Capítulo 5 se describe la metodología de los ensayos de pórtico de simulación de la zona de transmisión y de la zona de anclaje. En el Capítulo 6 se describen los resultados obtenidos con estos ensayos, y los valores deducidos a partir de los mismos, de las longitudes de transmisión y longitud complementaria a tracción (concepto que se refiere a longitud de anclaje menos la longitud de transmisión), y se critican estos ensayos.

En el Capítulo 7 se describe la metodología de fabricación de los prismas pretensados de pretensado centrado consistente en un único cordón de pretensado de 15.2 mm, a fin de estudiar la zona de transmisión de los diferentes materiales. En el Capítulo 8 se describen los resultados obtenidos de la instrumentación manual y electrónica empleada, y se facilitan las longitudes de transmisión obtenidas.

Los Capítulos 9 y 10 corresponden al estudio realizado con vigas pretensadas a escala, fabricadas e instrumentadas para esta investigación. En el Capítulo 8 se detallan los criterios de diseño de las mismas, y se describe el proceso de fabricación e instrumentación. En el Capítulo 9 se describen los resultados obtenidos durante la fabricación y posterior ensayo de parte de los elementos fabricados, relativos a la zona de transmisión y la zona de anclaje.

En el Capítulo 11 se realiza una comparación de los resultados obtenidos con los diferentes ensayos, y se evalúan los diferentes métodos de ensayo.

Finalmente, en el Capítulo 12 se exponen las conclusiones del presente trabajo y las perspectivas de futuros trabajos.

Además, se facilitan un mapa de ensayos y el anexo de nomenclatura a fin de facilitar la identificación y comprensión de las diferentes fases de la investigación.

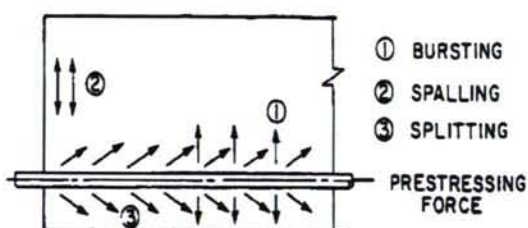
## Capítulo 2

### ESTADO DEL CONOCIMIENTO

En este capítulo se resumen los resultados de las investigaciones llevadas a cabo acerca de las propiedades del hormigón ligero estructural, las zonas de transmisión y anclaje de los elementos pretensados con cordones, y los procesos de fabricación y casos de patología de elementos pretensados de armadura pretesa. También se resumen las formulaciones de las diferentes normativas y recomendaciones, relativas a la zona de anclaje. Seguidamente, se hace un resumen de los factores que determinan la adherencia, según las investigaciones realizadas anteriormente expuestas. Por último, se resumen las variables estudiadas en la presente investigación.

#### 2.1. INTRODUCCIÓN

En las vigas de hormigón pretensado de armadura pretesa, se conviene en denominar a los distintos tipos de fisuración de la siguiente forma (Figura 2.1-1, WEER91, acorde con CM90):



1. Fisuración por estallido (bursting).
2. Fisuración por exfoliación (spalling).
3. Fisuración por hendimiento (splitting).

Figura 2.1-1: Tensiones de tracción transversales en la zona de anclaje (WEER91)

Generalmente, en elementos pretensados de armadura pretesa, las fisuras debidas a hendimiento y estallido se presentan en la misma zona, por lo que es difícil distinguirlas. A partir de ahora a este tipo de fisuras las denominaremos fisuras por hendimiento, quedando sobreentendido que pueden deberse a la interacción de ambos efectos.

La zona de anclaje de los elementos pretensados de armadura pretesa constituye una zona de discontinuidad, por lo que el estudio de las tensiones generadas se suele realizar mediante modelos biela tirante (DENU91, CALA99). Este tipo de análisis corresponde a un enfoque de estados límites últimos, en los que el hormigón está fisurado y las tensiones de tracción son resistidas por las armaduras. Por ello, este tipo de enfoque no es viable en caso de elementos pretensados sin armadura de confinamiento (DENU91).



Las expresiones de la normativa americana para la determinación de la longitud de anclaje se basan en las investigaciones llevadas a cabo en los años 50 y a principios de los años 60, a cargo de Hanson y Kaar (1959). En aquella época el pretensado más habitual consistía en alambres de 6.4 mm y de 9.5 mm de diámetro. Los cordones de 12.7 mm de diámetro eran considerados de gran tamaño. En esa época, Hanson y Kaar (1959) y Janney (1963) efectuaron ensayos de adherencia con cordones de gran tamaño. A partir de los resultados obtenidos se dedujeron las expresiones que permanecen en vigor actualmente en las normativas norteamericana y canadiense.

Sin embargo los procesos de fabricación del acero de pretensado han cambiado considerablemente desde entonces. Se cree que las diferencias de comportamiento adherente detectadas en los últimos años pueden estar motivadas por esos cambios<sup>2.1</sup>. La variación de las características del acero se resume en la Tabla 2.1-1.

Tabla 2.1-1

DENOMINACIÓN	Grade 250	Grade 270
<b>Empleo</b>	Años 50 a 65	Actualidad
<b>Carga unitaria máxima</b>	250ksi $\approx$ 1720MPa	270ksi $\approx$ 1860MPa
<b>Transmisión de calor en tratamiento térmico</b>	Convección: temperatura superficial más alta que puede eliminar restos de jabón de trefilado	Inducción: calentamiento uniforme a temperaturas más bajas
	Producción de calor con combustibles orgánicos que pueden eliminar residuos del jabón de trefilado	Ausencia de combustibles
<b>Otros tratamientos</b>	—	Tratamiento de baja relajación
<b>Diámetro de cordón de pretensado</b>	Empleo mayoritario de cordón de 0.5"	Empleo indistinto de cordón de 0.5 y de 0.6"

Actualmente se emplean indistintamente como jabones de trefilado el estearato de sodio, que es soluble en agua, y el estearato de calcio, no soluble en agua. Diversos autores defienden la mejor propiedad adherente de los cordones fabricados con estearato de sodio soluble<sup>2.2</sup>.

## 2.2. INVESTIGACIONES PREVIAS

En 1939 Hoyer & Friedrich (HOYE39) atribuyeron el anclaje de alambres lisos en hormigón pretensado al efecto de acuíñamiento del alambre durante la transferencia, debido al módulo de Poisson del acero (véanse las Figuras 2.2-1 y 2.2-2). Este efecto ha sido denominado a partir de entonces efecto Hoyer.

<sup>2.1</sup> PCI Journal, enero-febrero, 1998.

<sup>2.2</sup> PCI Journal, enero-febrero, 1997.

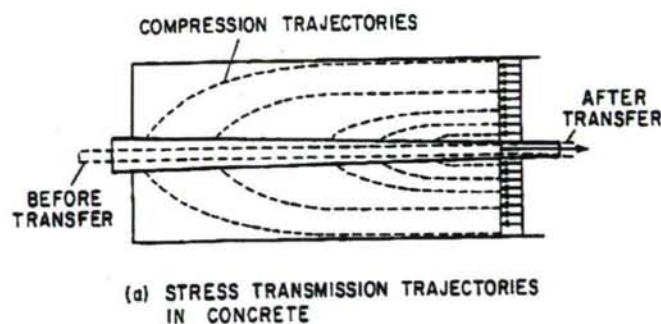


Figura 2.2-1: (WEER91)

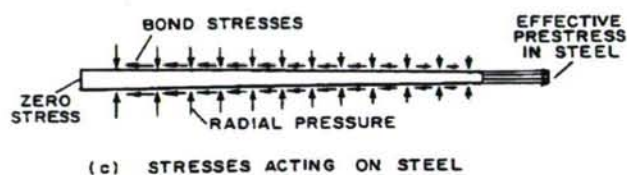


Figura 2.2-2: (WEER91)

A finales de los años cuarenta Armstrong realizó ensayos con prismas pretensados de 2.44 m de longitud (ARMS49). El pretensado estaba constituido por alambres de 4.76 mm de diámetro. La tensión de tesado corresponde a la tensión máxima permitida por aquel entonces, el 70% de la carga unitaria máxima (acero 250). La transferencia se realizó a los 7 días, cuando la resistencia del hormigón alcanzó los 35 MPa. Se comprobó la falta de capacidad adherente, puesto que se detectaron deslizamientos en la zona central. Por ello no se obtuvieron valores de la longitud de transmisión.

En 1949, Marshall (MARS49) llevó a cabo dos series de ensayos con prismas pretensados con numerosos alambres de 2.03 mm y de 5.08 mm de diámetro, tesados respectivamente a 1552 y a 1083 MPa. Las longitudes de transmisión obtenidas, a partir de las medidas de deformación del hormigón en los paramentos laterales fueron de 203 mm y de más de 762 mm (la mitad de la longitud de los prismas, por lo que no se dispone de este resultado) respectivamente. Marshall observó una relación lineal entre la tensión de adherencia y la fuerza de pretensado en cada sección, por lo que dedujo que la tensión del acero y la distribución de las tensiones de adherencia son funciones exponenciales.

En 1953, Guyon (GUYO53) presentó una aproximación teórica de la tensión de adherencia en la zona de transmisión. Planteó que la zona de transmisión está dividida en dos zonas: una elástica, en la que la tensión de adherencia aumenta desde cero, en la zona más interna de transmisión, hasta el valor máximo; y una zona de adherencia por rozamiento, desde el extremo de la pieza hasta la zona elástica.

La denominación de la zona elástica se basa en la hipótesis de que la adherencia es directamente proporcional al deslizamiento experimentado en esa zona, lo que resulta en una ley exponencial de la tensión de adherencia. El modelo se basa en la hipótesis de comportamiento elástico del pretensado y del hormigón. En la zona de fricción, Guyon supone una tensión de adherencia constante, y por lo tanto, una tensión del pretensado lineal a lo largo del elemento.



Guyon concluyó que la transferencia de pretensado con alambres lisos era inviable, dado que la longitud de transmisión podía variar de varias pulgadas a varios pies, dispersión inaceptable en la práctica.

En 1954 Janney (JANN54) realizó ensayos en prismas y en vigas pretensadas, en lo que constituye la primera referencia encontrada sobre el estudio de la longitud complementaria a tracción. En este artículo, Janney empleó la clasificación de las tensiones de adherencia clásica: adherencia por adhesión, rozamiento y mecánica. En el caso de alambres de pretensado, Janney indicó que la acción de la adherencia de adhesión y mecánica es despreciable, por lo que el papel fundamental lo juega el rozamiento, y el efecto Hoyer. Además, Janney realizó un análisis elástico para determinar las tensiones en la zona de transferencia, si bien explicó en las conclusiones (JANN54) que estas tensiones suponen una referencia cualitativa, dado que superan la resistencia a tracción del hormigón.

En 1955 Evans y Robinson (EVAN55) aplicaron las técnicas de rayos X al estudio de la adherencia, aparte del análisis de las deformaciones en el paramento de hormigón. De esta forma observaron que la longitud de transmisión real es menor que longitud medida en el paramento a partir de las deformaciones del hormigón (efecto Saint-Venant). También observaron un aumento de la longitud de transmisión apreciable a lo largo del tiempo, de un 87 y un 50% para el alambre de 5.08 mm y de 2.03 mm respectivamente.

En 1957 Base (BASE57) investigó las longitudes de transmisión obtenidas a partir de del estudios de vigas de la producción habitual de diversas fábricas de Inglaterra, midiendo las deformaciones del hormigón en el paramento. Además realizó una campaña experimental en laboratorio para medir la longitud de transmisión de diferentes diámetros de alambre, y de barras Macalloy de 15.9 mm de diámetro. El aumento de longitud de transmisión observado con el tiempo fue muy reducido, del orden de 7.5 mm como máximo en 183 días.

En 1958 Faulkes (FAUL58) realizó una campaña de ensayos en vigas y en probetas pull-out, con varios diámetros de alambre, de acabado liso e indentado, y hormigones de diferentes capacidades resistentes. Faulkes observó la influencia del espesor de la capa de hormigón fresco por debajo del pretensado: a mayor espesor, longitudes de transmisión más elevadas. No observó una variación apreciable de la longitud de transmisión con la resistencia del hormigón. Detectó aumentos de la longitud de transmisión con el tiempo, de hasta 140 mm a los 28 días, producidos mayoritariamente durante los primeros dos días. También observó que la longitud de transferencia en vigas dependía del canto total del elemento pretensado, hecho que no explicó. Creemos que esta última observación está debida al “ruido” que introducen las deformaciones debidas a las contraflechas, a causa de la movilización del peso propio de las vigas.

En 1959 Hanson y Kaar (HANS59) publicaron los resultados de una campaña de ensayos con vigas pretensadas con dos a seis cordones de acero Grade 250, de diámetros desde  $\frac{1}{4}$ ” a  $\frac{1}{2}$ ”. Se realizaron determinaciones de la longitud de transmisión y ensayos para la determinación de la longitud de anclaje. El objetivo de estos ensayos fue determinar los factores que afectan la adherencia y el deslizamiento. Los factores que estudiaron principalmente son la influencia del diámetro del cordón en la longitud de anclaje, y en segundo término la influencia de la cuantía de armadura de confinamiento, la resistencia del hormigón y el estado superficial. Se dispusieron galgas adheridas al



pretensado, y relojes comparadores para determinar deslizamiento y flechas. Los autores postularon la transmisión de las tensiones de adherencia en forma de ondas, a partir de la formación de las fisuras (véase la Figura 2.2-3). Además, para carga creciente detectaron descensos de deformación del pretensado, lo que identificaron como deslizamiento. En los casos en que detectaron deslizamiento generalizado, la viga siguió resistiendo, por lo que dedujeron que se producían grandes tensiones de adherencia a pesar del deslizamiento generalizado, hecho que achacaron a la adherencia mecánica.

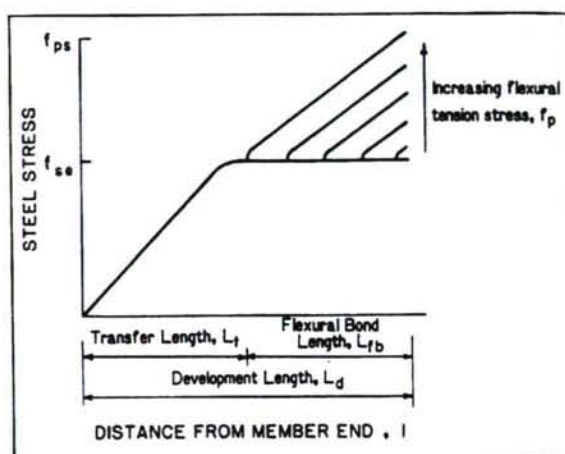


Figura 2.2-3: (COUS90b)

En 1963 Kaar, LaFraugh y Mass (KAAR63) publicaron el resultado de la investigación que, junto con la precedente, estableció las bases en que se apoyó Mattock para la formulación de la normativa ACI de 1963, actualmente vigente (TAB93, ACIC99). Esta campaña de ensayos tenía como finalidad estudiar la influencia de la resistencia del hormigón en la longitud de transmisión. Para ello se fabricaron prismas de pretensado centrado y sección rectangular, con varios cordones de pretensado. La tensión del hormigón tras la transferencia se fijó en  $0.6f_c'$ , es decir, el 60% de la resistencia estimada antes de la transferencia. El pretensado se tesó a  $0.7f_{pu}$ , 70% de la carga unitaria máxima (acero Grade 250). Los cordones estaban limpios y sin óxido (condiciones de adherencia desfavorables) y la transferencia se realizó con soplete. No se observó influencia de la resistencia del hormigón.

La longitud de transmisión medida en el lado activo fue del 20% superior a la del lado pasivo. No se observaron variaciones apreciables de la longitud de transmisión con el tiempo. La presencia de armadura de confinamiento espiral condujo a longitudes de transmisión un 15% inferiores. Las leyes de deformación del hormigón presentaban perfiles cóncavos o convexos, dependiendo de la resistencia del hormigón. Para hormigones de altas resistencias, el perfil observado fue convexo.

Los resultados de las investigaciones de Kaar et al. han sido exhaustivamente revisados por diferentes investigadores, en busca de la justificación de la actual formulación de la ACI. Las críticas se han dirigido a la sistematización de variación de las variables: en algún caso entre diferentes ensayos se varió más de un parámetro, lo que impide realizar un análisis de sensibilidad de cada uno por separado.



Otro punto criticado es la deducción de las expresiones de longitud de transmisión y anclaje total de la ACI, a partir de los resultados experimentales. Mattock aplicó regresión a los valores medios de los resultados obtenidos, no a los valores más desfavorables, por lo que la seguridad en la comprobación es reducida (TABA93). Por otra parte, las expresiones deducidas se basan en la experimentación llevada a cabo con cordones de pretensado de 0.5", de acero Grade 250. Actualmente se aplican a cordones de acero de 0.6", y Grade 270 (1860 MPa de carga unitaria máxima), para lo cual se extrapolan los resultados experimentales, a una situación del lado de la inseguridad.

En 1963 Janney (JANN63) publicó los resultados de la investigación llevada a cabo con el nuevo tipo de acero, Grade 270. Se fabricaron 6 prismas pretensados, con un único cordón de pretensado de 0.5" centrado. Dos prismas contenían cordón de acero Grade 250 liso y brillante, dos cordón de pretensado liso y brillante de acero 270, y otros dos cordón de pretensado ligeramente oxidado del nuevo material. Janney concluyó que el acero Grade 270 era satisfactorio para todos los tamaños pequeños, en aplicaciones normales.

En 1963 apareció una nueva versión de la norma ACI<sup>2,3</sup>, con la nueva formulación de la longitud de anclaje, formulación que permanece en vigor.

En 1965 Over y Au (OVER65) llevaron a cabo una investigación para comparar las longitudes de transmisión de cordones de diferentes tamaños, respecto a la que presenta un alambre de referencia de 6.4 mm de diámetro. Se fabricaron dos prismas por tipo de pretensado. Comparando el crecimiento de la fuerza de pretensado para el alambre y el cordón de misma capacidad resistente, tesados a la misma tensión, llegaron a la conclusión de que los cordones presentan una adherencia mecánica superior a la de los alambres, pudiendo desarrollar tensiones de adherencia tras el deslizamiento.

En ese mismo año, Kaar y Magura (KAAR65) estudiaron el efecto de enfundar los cordones de pretensado a lo largo de una cierta distancia desde al extremo del elemento (cordones parcialmente enfundados). Para ello se fabricaron vigas AASHTO, a escala: tres vigas para ensayar a flexión, dos con cordones parcialmente enfundados y una sin ellos. Las vigas se sometieron a 5 millones de ciclos con la carga de servicio, y se ensayaron posteriormente a rotura. Otras dos vigas se fabricaron para determinar la resistencia a cortante: una sin cordones enfundados, la otra con cordones parcialmente enfundados. Los autores concluyeron que la longitud de anclaje de los cordones enfundados era el doble de la correspondiente a cordones sin enfundar. No se observaron efectos desfavorables en la resistencia a cortante. La explicación de la longitud de anclaje tan elevada es que la zona donde se anclan los cordones enfundados está sometida a menudo a esfuerzos de flexión, y, por lo tanto, a una cierta fisuración. A partir de estos resultados, la normativa americana introdujo esa restricción para los cordones enfundados, que permanece en vigor (ACIC99).

En 1969 Hanson (HANS69) investigó la influencia del estado superficial del cordón de pretensado: sin oxidación apreciable, parcialmente oxidados y con un acabado indentado. Se fabricaron 14 vigas pretensadas con 4 cordones de 0.44" y 0.5" de diámetro. La transferencia se realizó con soplete. Las vigas se ensayaron a posteriormente a flexión. El autor concluyó que el cordón oxidado superficialmente

---

<sup>2,3</sup> ACI Committee 318.



presenta mejora del 30% en la longitud de transmisión. La resistencia a flexión fue superior en los cordones oxidados y los indentados.

En ese mismo año, Holmberg y Lindgren (HOLM70) realizaron ensayos de determinación de la longitud de transmisión y anclaje en vigas. Las variables estudiadas fueron la tensión de tesado, el diámetro del cordón (de 0.5" como máximo), el estado superficial, el recubrimiento, la separación entre cordones y la cuantía de armadura de confinamiento. Estos autores postularon el crecimiento lineal de la fuerza de pretensado a lo largo de la longitud de transmisión, a partir de la observación de las deformaciones del paramento, a la altura del pretensado inferior. Los autores no observaron ninguna influencia de las resistencias del hormigón a la edad de transferencia, sobre las propiedades adherentes, para las dosificaciones empleadas. También midieron la longitud de transferencia del pretensado superior, que resultó superior a la del pretensado inferior, por lo que recomendaron multiplicar el valor de la norma por 1.5 en este caso. No observaron variaciones de comportamiento en función del recubrimiento o separación entre cordones.

Jones y Furr publicaron un informe (JONE70) en el que se describen los resultados de los ensayos realizados para determinar la longitud de anclaje de prelosas pretensadas con cordón de pretensado de 3/8" y 0.5" de diámetro.

Se emplearon dos dosificaciones de hormigón, correspondientes a un hormigón convencional y un hormigón ligero. La resistencia alcanzada a la edad de transferencia (24 h aproximadamente tras el hormigonado) fue de 35 MPa para ambos hormigones. La transferencia se realizó gradualmente, mediante el propio gato de pretensado.

Las dimensiones de la losa pretensada con cordones de 0.5" son 559×83×1727/2743 mm. Los cordones de pretensado estaban centrados respecto al espesor del elemento. La separación entre cordones era de 279 mm, y el recubrimiento lateral neto era de 127 mm. El recubrimiento neto vertical fue de 35 mm. No hay referencia alguna a la aparición de fisuras por hendimiento. Se determinaron las longitudes de transmisión y de anclaje, esta última a partir de ensayos estáticos y dinámicos.

Los valores de longitud de anclaje obtenidos para las placas con cordones de 0.5" fueron 864 mm, para ambos tipos de hormigón. El efecto dinámico sobre la longitud de anclaje fue despreciable.

En 1974 Swamy y Anand (SWAM74) estudiaron la adherencia de vigas pretensadas de hormigones de altas resistencias (68 a 85 MPa a la edad de transferencia) a largo plazo. Las variables fueron el tipo de cemento (un cemento aluminoso y un cemento Portland ultrafino), la edad de transferencia y la influencia de la armadura de confinamiento helicoidal. Se comprobó que la longitud de transferencia disminuye cuando aumenta la edad de transferencia. El efecto de armadura de confinamiento helicoidal adicional fue disminuir la longitud de transferencia. Por último, se observó un aumento de la longitud de transmisión considerable con el tiempo, de un 11 a un 16% superior.

En 1975 Kaar y Hanson (KAAR75) publicaron los resultados de ensayos dinámicos en vigas pretensadas con un único cordón de pretensado de 9.5 mm, fabricadas con hormigón a partir de cemento normal y cemento con regulador de fraguado. No observaron aumentos apreciables de la longitud de transmisión. Concluyeron que el uso de cemento con regulador de fraguado mejora las propiedades adherentes a fatiga.



En 1976 Anderson y Anderson (ANDE76) publicaron los resultados de la investigación de la capacidad resistente a flexión de placas alveolares pretensadas procedentes de la producción habitual, buscando correlacionar la resistencia y la penetración del cordón. Encontraron una correlación entre el deslizamiento y la capacidad a flexión, por lo que propusieron la aplicación de factores correctores de resistencia, función del deslizamiento, diámetro nominal y longitud de anclaje.

En 1977 Zia y Moustafa (ZIA77) efectuaron una investigación bibliográfica exhaustiva sobre las propiedades de adherencia. Analizando los resultados de investigaciones anteriores analizaron los diferentes factores. Finalmente propusieron una expresión para la longitud de anclaje.

Como se puede observar, las investigaciones sobre cordones de pretensado de 0.6" de diámetro son prácticamente inexistentes hasta los años ochenta. En esa época la Florida Wire & Cable Company desarrolló el cordón de pretensado recubierto de epoxi. Dorsten, Hunt y Preston (COUS86) realizaron ensayos de determinación de la longitud de transmisión con cordones convencionales de 0.5" y cordones recubiertos del mismo diámetro. Los valores de longitud de transmisión obtenidos tras la transferencia y al cabo de 14 meses fueron similares en ambos casos, si bien en algunos casos se detectó un problema de fisuración por hendimiento durante la transferencia.

En 1986 Cousins y Johnston (COUS86) retomaron la investigación de la adherencia del cordón recubierto de epoxi, tomando como referencia el cordón convencional. Realizaron ensayos en prismas pretensados con pretensado centrado, ensayos "pull-out" y vigas. Obtuvieron resultados de longitud de transferencia, longitud de anclaje y comportamiento frente a fatiga. Se realizaron medidas de la longitud de transmisión durante un año. Los diámetros de cordón empleados fueron 0.375", 0.5" y 0.6". Los recubrimientos adoptados fueron resina epoxi, y tres tipos de mortero epoxi fabricados con esquirlas de vidrio con mayor o menor concentración para aumentar la adherencia. Los resultados obtenidos indicaron valores de longitud de transmisión elevados para cordón sin recubrimiento. Los valores de la longitud de anclaje obtenidos experimentalmente fueron superiores a los predichos por la normativa ACI. Respecto a los ensayos dinámicos, ningún elemento sufrió rotura por fatiga, tan sólo se observaron aumentos de flecha, que atribuyeron a fluencia del hormigón a compresión.

Las diferencias detectadas entre la predicción de ACI y los resultados experimentales de la longitud de transmisión alcanzaron diferencias de incluso el 100%, en cordón de 0.5".

En respuesta a estos resultados, y reconociendo las deficiencias de la formulación de la ACI (TABA93), la FHWA publicó en octubre de 1988 un memorándum restringiendo el uso del pretensado adherente a base de cordones de pretensado: se limitaron las separaciones entre cordones de pretensado a 4 diámetros entre centros de cordón (DEAT94); se prohibió el uso de cordones de 0.6" para aplicaciones de pretensado; en el resto de los tamaños, se aumentó la longitud de anclaje de cálculo en un 60% (cordones adherentes) y en un 100% (cordones enfundados, a partir de donde comienza la adherencia). Este memorándum estableció las antedichas restricciones como medida interna, mientras se llevaban a cabo las investigaciones pertinentes, y hasta la adopción de nuevas medidas por parte de la AASHTO (LANE92).

Esto supuso que el tema de la adherencia se haya convertido, a lo largo de los últimos años, en un tema ampliamente investigado y discutido en Norteamérica (LANE92).



Por otra parte, en agosto de 1996 los fabricantes de cordón de pretensado fueron alertados de un problema potencial de falta de adherencia. Por ello se les recomendó la realización de un ensayo de pre-cualificación del pretensado, consistente en un ensayo "pull-out" sobre cordones de pretensado sin tensión, basado en los ensayos realizados por Moustafa y Zia en 1974 (véanse Figura 2.2-4 y Figura 2.2-5). Este ensayo se denominó el "Moustafa pull-out test". Simultáneamente se realizó una campaña de ensayos para correlacionar los resultados proporcionados por este ensayo con los de 60 elementos pretensados a escala. Como consecuencia de esta investigación se establecieron unas recomendaciones de tensión de adherencia mínima obtenidas a partir del ensayo Moustafa. Para la realización del ensayo el PCI proporcionó un procedimiento a sus socios, planteado por Don Logan (PCI96a, PCI96b).

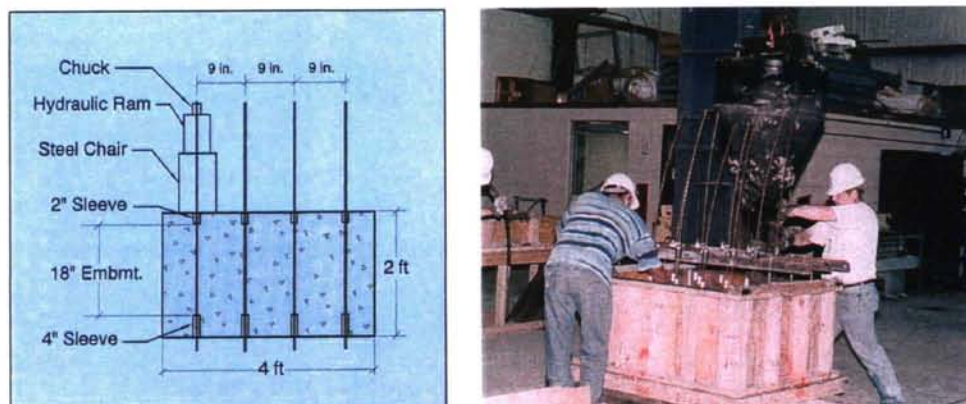


Figura 2.2-4: Esquema del ensayo "pull out" de Moustafa. Imagen del hormigonado (ROSE97)

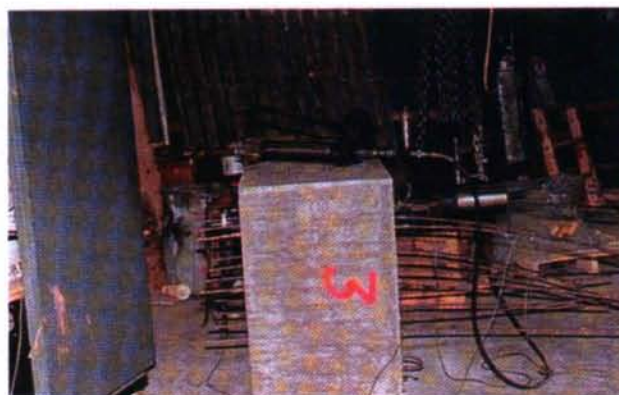


Figura 2.2-5: Imagen durante la realización del ensayo Moustafa (ROSE97)

Por otra parte la FHWA, ante la necesidad de investigaciones sobre el tema coordinó la investigación entre diversas universidades de Estados Unidos y Canadá (véanse LANE90, FHWA94).

Como consecuencia, durante los últimos años han aparecido numerosas publicaciones sobre los siguientes temas:

- Búsqueda de un ensayo estándar para la evaluación de la capacidad adherente del acero de pretensado, a fin de llenar el vacío normativo en este campo.
- Determinación de la longitud de transmisión y anclaje de cordones convencionales totalmente adherentes, y parcialmente enfundados.



- Determinación de las propiedades adherentes del pretensado, cubierto de mortero de epoxi.
- Estudio comparativo de las propiedades adherentes de tendones de pretensado no metálicos (FRP, ...).
- Métodos numéricos para la evaluación de las tensiones en la zona de anclaje.

La prohibición de empleo de cordones de pretensado de 0.6" permanecía en vigor en 1997, exceptuando aplicaciones especiales (según RUSS97), si bien según Rose en esa misma época ya se había levantado (ROSE97). Actualmente la investigación prosigue, debido a la ausencia de ensayo normalizado y a la experimentación sobre tendones de pretensado recubiertos de epoxi y tendones adherentes no metálicos, investigación que se realiza habitualmente de forma comparativa con cordones convencionales de acero.

### 2.3. HORMIGÓN LIGERO

El hormigón en masa de áridos ligeros fue ya utilizado por los romanos, en la construcción de la cúpula del Panteón, de 44 metros de diámetro, que data del siglo II A.C. (WEIG74, véase la Fotografía 2.3-1).

Sin embargo, el hormigón ligero armado y pretensado no se empleó hasta los años veinte, en los que se desarrollaron procedimientos de fabricación de áridos ligeros artificiales a partir de arcillas y pizarras expandidas (Hayde, 1917).



*Fotografía 2.3-1 (Panteón de Roma, siglo I A.C.)*

En este apartado se resumen las realizaciones de hormigón ligero pretensado, las propiedades generales y las investigaciones acerca de la resistencia a tracción del hormigón ligero.

### **2.3.1. REALIZACIONES DE VIGAS PRETENSADAS DE HORMIGÓN LIGERO**

La utilización del hormigón ligero en la construcción de puentes de carretera data del año 1922 (RAIT81). Una de las primeras aplicaciones del hormigón ligero fue la construcción de barcos durante la primera guerra mundial, debido a la escasez de acero. Tras 34 años de inmersión parcial, el hormigón no presentaba deterioro significativo del hormigón ni de las armaduras, a pesar de que el recubrimiento en algunos casos no superaba los 16 mm; esto constituye un indicador de buena durabilidad.

Tras la segunda guerra mundial, el hormigón ligero se incorporó a la fabricación de elementos pretensados, especialmente losas y viguetas de edificación. También se fabricaron algunas vigas para puentes (FHWA85). Cuando salieron al mercado las vigas AASHTO tipo I, varios estados fabricaron estas vigas con hormigón ligero. Sin embargo, el empleo de este tipo de vigas no se ha extendido, “quizás debido al elevado coste y a problemas operacionales en los parques de prefabricados” (FHWA85). No se ha encontrado referencia explícita a estos “problemas operacionales”. Sin embargo, sí se extendió el empleo de hormigón ligero para la fabricación de prelosas (FHWA85).

En una comunicación personal el Profesor Walraven nos manifestó que en Holanda se fabricaron vigas pretensadas de hormigón ligero, y que algunas presentaron problemas durante el proceso de fabricación, debido a la aparición de fisuración por estallido y hendidamiento durante la transferencia. En aquel entonces, esto se achacó a deficiente mano de obra.

Bardhan-Roy, en una ponencia del Segundo Congreso Internacional de Hormigón Ligero (BARD80) hizo referencia a ensayos de hormigón ligero realizados en Garston, en los que se concluyó que la longitud de transmisión era de 100 diámetros para alambre, y de 50 diámetros para cordón de pretensado. No se especificaba ninguna dosificación, ni el diámetro de los cordones de pretensado ensayados, ni la tensión de tesado, ni qué tipo de elementos se emplearon.

En el mismo congreso, otra ponencia de un equipo ruso (KORN80) postuló que la longitud de anclaje para hormigón pretensado ligero es similar a la del hormigón convencional, exceptuando el caso del hormigón con el 100% de árido ligero, en que la longitud de anclaje considerada es un 20% superior. En este caso, tampoco se especificaban ni tensiones de tesado, ni diámetros de cordón, ni tipo de elemento, ni separación entre cordones, ...

En un artículo de esta misma época (TANS80) aparece una referencia a vigas pretensadas de armadura pretesa de hormigón ligero, a partir de arcillas expandidas o escorias aglomeradas. Dichas vigas se fabricaron a partir de escorias aglomeradas, que proporcionan según el autor:

- Mejores propiedades tenso-deformacionales.



- Propiedades hidráulicas que permiten ahorro de cemento, y proporcionan ganancias de resistencia a los 28 días superiores a las que experimenta el hormigón ligero de arcilla expandida.

En 1981 Raithby y Lydon (RAIT81) presentaron un resumen de las realizaciones de puentes de carretera de hormigón ligero. Los autores defendían que la durabilidad de este tipo de estructuras era al menos tan buena como la que presentan las estructuras de hormigón convencional. Según los autores, los pocos casos de prestaciones deficientes de este tipo de elementos fueron probablemente debidos a detalles de armado defectuosos, o a un deficiente control de calidad durante la ejecución. Se hacía referencia a la construcción en la antigua URSS de 100 puentes de carretera de vigas pretensadas con longitudes de 12 a 33 m entre 1965 y 1980, con áridos de arcilla expandida.

En el mismo artículo se hacía referencia al inicio del empleo en Alemania de “hormigón ligero normal”, denominado así porque tan sólo un 20% del árido grueso se reemplaza por árido ligero. La densidad estimada de este hormigón es de 20 kN/m<sup>3</sup>.

Actualmente la PCI (PCID99) dispone de una colección de vigas pretensadas de hormigón ligero, con cordones de 0.5”. No se especifica la separación entre cordones, ni los recubrimientos adoptados, ni las características resistentes del hormigón.

No se han encontrado referencias bibliográficas explícitas sobre el empleo de cordones de pretensado de 15.2 mm de diámetro en elementos pretensados de hormigón ligero.

### **2.3.2. PROPIEDADES GENERALES DE LOS HORMIGONES LIGEROS ESTRUCTURALES**

En este apartado se resumen las principales características de los hormigones ligeros, por comparación a hormigones convencionales de las mismas características resistentes.

#### **2.3.2.1. Características del árido ligero**

La característica fundamental del árido ligero, aparte de su densidad, es su elevada porosidad superficial, lo que le confiere una gran capacidad de absorción de agua (del orden del 8.5% en el caso de la arcilla expandida al cabo de 24 horas, ensayo ASTM C-127, ARLI96). La porosidad condiciona la absorción de agua por parte del árido durante el hormigonado, puesta en obra y endurecimiento.

Esta propiedad es la responsable en primer lugar del comportamiento en fresco del hormigón ligero, puesto que condiciona la cantidad de agua eficaz durante el endurecimiento.

La capacidad de absorción de agua condiciona la cantidad de agua total de amasado necesaria y, por lo tanto, la cantidad de agua eficaz. Cuanto mayor sea la humedad del árido ligero al inicio del amasado, menor será la demanda de agua durante el amasado y puesta en obra. Por el contrario, cuanto más seco esté el árido ligero, mayor será la demanda de agua durante el amasado y puesta en obra, por lo que serán de esperar descensos acusados de la docilidad del hormigón.

Se denomina cantidad de agua total de la mezcla, a la suma del agua añadida durante el amasado, y el agua contenida en los poros superficiales del árido ligero. De la cantidad de agua total tan sólo una cantidad está presente en la pasta durante el amasado. A esta agua se le denomina agua eficaz, porque:

- Es la que le confiere al hormigón un comportamiento más o menos plástico durante el estado en fresco.
- Es la cantidad de agua que está disponible para reaccionar con el cemento. Por esto en hormigón ligero no se habla de relación agua-cemento, sino de relación agua eficaz-cemento. La relación agua eficaz/cemento está íntimamente relacionada con el resto de las propiedades deformacionales y resistentes del hormigón.

Esta es la razón de que la humedad inicial del árido ligero sea relevante en la dosificación del hormigón. La pregunta que se suscita es ¿Qué pasa con el agua contenida en los poros superficiales del árido ligero durante el proceso de endurecimiento (BARR98)?

Al respecto, Barra y Vázquez, en un trabajo acerca de hormigones fabricados con áridos reciclados (que tienen en común con los áridos ligeros la elevada capacidad de absorción de agua, de un 7-14%, según el ensayo ASTM C-462) postulan dos posibilidades:

- Empleo de áridos no saturados: en este caso, durante el amasado, puesta en obra y período de endurecimiento puede producirse migración de agua hacia el interior del árido, teóricamente hasta que se produzca la saturación del mismo. En realidad se establecerá un equilibrio dinámico entre el agua de los poros y el agua de la pasta. Si se produce migración de agua hacia la pasta, dependiendo de que ésta haya endurecido o no, el efecto puede ser favorable o desfavorable:
  - Si la pasta ha endurecido, el agua procedente de los poros contribuye al curado de la pasta, lo que redundará en una mejora de la capacidad resistente de la pasta.
  - Si, por el contrario, la pasta no ha endurecido, aumenta la relación agua eficaz-cemento, con el consiguiente empeoramiento de las propiedades tenso-deformacionales y, por lo tanto, de la adherencia pasta-árido.
- Empleo de áridos saturados: en este caso, no existe probabilidad de migración de agua hacia el interior del árido. Probablemente, el exceso de agua de los poros redunde en una migración de agua hacia el exterior, lo que conduciría a un exceso de agua en la interfase, presencia de coqueras y menor capacidad adherente entre pasta-árido.

Respecto al comportamiento en fresco, los hormigones ligeros presentan el problema particular de la segregación debido a su baja densidad: si la viscosidad de la pasta es baja, existe una tendencia de los áridos a presentar flotación. De esta forma, la concentración de los áridos en el hormigón fresco aumenta en la parte superior y disminuye en la parte inferior de la tongada (WEIG74). Por ello, son desaconsejables las dosificaciones de hormigón ligero fluido.



### 2.3.2.2. Comportamiento tenso-deformacional

En el año 1995 el CUR publicó un resumen de las investigaciones llevadas a cabo con hormigones ligeros, a base de árido ligero grueso consistentes en arcillas y pizarras expandidas, y arena natural. La finalidad de este estudio era la determinación de las propiedades del hormigón ligero estructural. En esta publicación además se establecen unos criterios de armado, relativos a la disposición de la armadura pasiva.

Se realizaron ensayos a compresión con control de deformaciones, lo que permitió la obtención de diagramas tensión-deformación completos, incluyendo la rama descendente. Se concluye que el comportamiento post-pico de ambos tipos de material es bastante similar. No se hace referencia a los valores de deformación última del hormigón ligero.

El CUR adopta, basándose en los resultados experimentales, un módulo de Poisson del hormigón ligero de 0.2 para hormigones de resistencias moderadas, y de 0.25 para hormigón ligero de alta resistencia (resistencia en probeta cúbica a los 28 días de 60 MPa) (CURR95).

Se realizó una campaña de ensayos de tracción indirecta, en probeta prismática. Los ensayos consistían en la aplicación de una carga concentrada, centrada en la cara superior e inferior de la probeta. En la campaña de ensayos se varió el área de aplicación de la carga y, por supuesto, el tipo de material. Los resultados de los ensayos realizados a tracción indirecta presentan, a juicio de los autores, una dispersión considerable (CURR95). Los autores concluyeron que la resistencia a tracción indirecta, determinada en probeta cúbica, de probetas curadas en ambiente seco es un 10% inferior a la del hormigón curado en ambiente húmedo (CURR95), debido a las tensiones internas producidas.

También se realizaron ensayos a tracción directa, en probetas cilíndricas de 64 mm de diámetro, en las que se practicó tras el endurecimiento una muesca perimetral central, de 5 mm de profundidad. Las probetas se instrumentaron longitudinalmente a deformación, con una longitud base de 110 mm. De esta forma se determinaron las curvas tensión de tracción/deformación hasta la rotura. Calculando el área bajo estas curvas se dedujo la energía de fractura,  $G_f$ , de cada material. Las leyes determinadas para la estimación de la energía de fractura de cada tipo de hormigón fueron:

$G_f = 24 + 26f_b$  Hormigones convencionales, de 30 y 60 MPa de resistencia a compresión en probeta cúbica a los 28 días.

$G_f = 24 + 16f_b$  Hormigones ligeros, de 30 y 60 MPa de resistencia a compresión en probeta cúbica a los 28 días.

donde:

$G_f$  energía de fractura, MPa

$f_b$  resistencia a tracción directa, MPa

Para el rango de resistencias a tracción obtenido en la investigación, los autores concluyeron que la energía de fractura del hormigón ligero es un 20% a un 30% inferior a la del hormigón convencional.



También se efectuaron ensayos “pull-out” de probetas de hormigón armado, con una longitud adherente de tres diámetros, para armaduras de 12, 16 y 20 mm de diámetro. El recubrimiento de las probetas era elevado, para impedir la rotura por hendimiento durante el ensayo. A partir de los resultados obtenidos se concluyó que la capacidad adherente del hormigón ligero es inferior a la del convencional, y que existe una elevada correlación entre la capacidad adherente y la resistencia a compresión.

También se realizaron ensayos de probetas de hormigón armado a tracción directa, para analizar el proceso de formación de fisuras y la fisuración estabilizada, y evaluar la rigidización bajo tensión (“tension stiffening”) en ambos tipos de hormigón. No se apreciaron diferencias cualitativas de comportamiento entre los hormigones convencionales y los ligeros.

Se concluyó que la capacidad adherente del hormigón ligero armado es considerablemente inferior a la del hormigón convencional con la misma resistencia a tracción indirecta.

También se investigó el solapo de armaduras. Para ello se construyeron vigas armadas, en las que el solapo de la armadura traccionada se dispuso en centro luz (zona más solicitada durante el ensayo). En la zona de solapo se colocaron cercos alrededor de la armadura longitudinal. Las vigas se ensayaron a flexión biapoyadas, con dos cargas concentradas aplicadas, simétricas respecto a centro luz. Se observó, que los solapos presentaban menor capacidad resistente en las vigas de hormigón ligero que en las de hormigón convencional. Como conclusión se recomendó no disponer solapos en las zonas críticas de la estructura, y separar lo máximo posible los solapos de armaduras de una misma sección. También se concluye que la resistencia del solapo no es proporcional a la longitud del mismo. Se recomienda que la longitud de solapo se aumentase un 30% para los hormigones ligeros, respecto al valor calculado para un hormigón convencional de la misma capacidad resistente.

Se investigó el comportamiento a cortante de las dosificaciones de hormigón ligero, comparativamente a las dosificaciones de hormigón convencional de la misma capacidad resistente. Para ello se confeccionaron vigas doble T, que se ensayaron biapoyadas con dos cargas concentradas, simétricas respecto a centro luz. Las conclusiones más importantes son:

- La resistencia a cortante de las vigas de hormigón ligero, de 30 MPa de resistencia a 28 días, es un 7% inferior a la de vigas de hormigón convencional de la misma capacidad resistente.
- La capacidad resistente a cortante fue en todos los casos superior a la calculada a partir de un ángulo  $\theta$ , entre la directriz y la dirección principal de las compresiones de 45°. Sin embargo, la capacidad resistente fue menor que la calculada a partir de un ángulo  $\theta = 30^\circ$ . Por ello los autores propusieron que se limitase el valor adoptado,  $\theta < 30^\circ$ .
- Se concluyó que, a pesar del escaso efecto pasador del árido ligero (las fisuras atravesaban el árido), las fisuras eran capaces de transmitir un esfuerzo cortante considerable.
- Los autores efectuaron un análisis numérico para predecir el comportamiento de las vigas sometidas a ensayo de cortante. El ajuste obtenido fue bueno.



### 2.3.2.3. Durabilidad del hormigón ligero

La durabilidad del hormigón ligero está determinada por la accesibilidad de los agentes corrosivos a la armadura: el proceso de corrosión está determinado por un fenómeno de transporte. Hay que distinguir entre el transporte a lo largo de las fisuras y el transporte a través del recubrimiento no fisurado (CURR95).

Existe una diferencia fundamental entre la fisuración del hormigón convencional y la del hormigón ligero: las fisuras en hormigón convencional discurren fundamentalmente entre los áridos, atravesando la pasta de cemento; en hormigón ligero las fisuras atraviesan los áridos. Esta diferencia es importante a la hora de establecer la posibilidad de “re-pasivación” de la armadura, una vez iniciado el proceso de corrosión. Este efecto de pasivación está motivado por el bloqueo de los propios productos de la corrosión (fenómeno de autoprotección de las armaduras). Cuando una fisura atraviesa el árido ligero, se ramifica en varias grietas de menor abertura. Por esto, el CUR concluye que en hormigón ligero es necesario más producto de la corrosión para frenar el proceso que en hormigón convencional. Esto significa que el hormigón ligero fisurado es más sensible a la corrosión.

Por lo que respecta al hormigón ligero sin fisurar, la sensibilidad a la corrosión es similar a la del hormigón convencional, debido a que la permeabilidad de ambos tipos de hormigón es parecida (CURR95). Los autores concluyeron que el hormigón ligero no es necesariamente menos duradero que el hormigón convencional, hecho constatado en la investigación y probado en estructuras existentes.

Al respecto, el Laboratorio de Ingeniería del Terreno realizó conjuntamente con el Laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la E.T.S.I.C.C.P. de La Coruña ensayos de determinación de la permeabilidad de probetas de hormigón ligero y convencional. Las probetas ensayadas procedían de las amasadas de esta investigación. Se realizaron ensayos de permeámetro de pared flexible, empleando para ello el equipo del ensayo triaxial. Como resultado de estos ensayos se concluyó que la permeabilidad saturada de ambos tipos de hormigón presenta valores medios del mismo orden de magnitud, aproximadamente  $2.15 \times 10^{-14}$  m/s de media para el hormigón ligero y  $2.1 \times 10^{-14}$  m/s para el hormigón convencional (CEA00). Por lo que respecta a la permeabilidad intrínseca, fue de  $1.9 \times 10^{-19}$  m<sup>2</sup> para el hormigón convencional, y de  $2 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup> para el HL.

Finalmente, y como resumen de la investigación realizada, el CUR señala las siguientes propiedades para un hormigón ligero de 1600 T/m<sup>3</sup> de densidad seca, respecto a un hormigón convencional de la misma resistencia a compresión (CURR95):

### 2.3.2.4. Resumen de las propiedades del hormigón ligero. Criterios de armado

- Módulo de deformación 42% inferior al del H.C.
- Coeficiente de fluencia 42% menor que el del hormigón convencional (para hormigones de resistencia a compresión superior a 25 MPa).
- Deformación de retracción 20% superior (para hormigones de resistencia a compresión superior a 25 MPa).
- Resistencia a tracción 18% menor que la del hormigón convencional.

Asimismo, establece los siguientes criterios de diseño:



- Cambios respecto a recubrimientos. Se recomienda adoptar el recubrimiento nominal del HC, aumentado en 5 mm en las caras que no están en contacto con el encofrado, y para estructuras en ambientes agresivos (3, 4 y 5).
- Cambios respecto a detalles de armado de H.A. y de H.P., y colocación de armadura transversal, motivados por la mayor tendencia del hormigón ligero a la fisuración por tracción indirecta y hendimiento ("splitting"). En consecuencia las propiedades de adherencia son diferentes, lo que conduce a mayores longitudes de anclaje, transmisión y solapo.
- Se señala que la causa de la menor resistencia de las estructuras a tracción indirecta es la combinación de menor resistencia a tracción, menor energía de fractura (área bajo la curva tensión de tracción-deformación) y menor módulo de elasticidad. Por ello, se resumen seguidamente las investigaciones llevadas a cabo acerca de la resistencia a tracción directa, frente a cargas rápidas y permanentes.
- Finalmente se hace hincapié en que los proyectistas han de ser conscientes de la necesidad de medidas suplementarias a los criterios anteriores, sobre todo en los referente a situaciones en que sea necesario garantizar la resistencia frente a hendimiento.

### **2.3.3. COMPORTAMIENTO A TRACCIÓN**

A continuación se resumen las investigaciones llevadas a cabo acerca de la resistencia a tracción directa de los hormigones ligeros y convencionales.

#### **2.3.3.1. Evans y Marathe (1968)**

Los autores (EVAN68) presentaron un resumen de los resultados de la experimentación llevada a cabo para determinar curvas tensión-deformación de probetas de hormigón convencional ensayadas a tracción directa, a una velocidad de 10 mm/m/s; también se estudió la microfisuración de las probetas durante el ensayo.

Los autores obtuvieron las curvas completas tensión-deformación para varias dosificaciones de hormigón convencional.

Los autores señalaron la importancia de captar mediante las bandas extensométricas las fisuras eventuales, para determinar el inicio de fisuración y la deformabilidad de manera precisa.

#### **2.3.3.2. Al-Kubaisy y Young (1975)**

Los autores (ALKU75) plantearon un método de ensayo para determinar la resistencia a tracción directa diferida. La detección de la fisuración de la probeta se realizó con ultrasonidos. Para poder aplicar ultrasonidos a lo largo de la probeta diseñaron un tipo de probeta, recrecida en los extremos, para poder sujetarla mecánicamente durante el ensayo.

Los autores realizaron ensayos de tracción diferida sobre probetas de hormigón convencional, manteniendo diferentes valores de tensión en el rango del 65 al 90% de la tensión instantánea de rotura.

Las conclusiones más importantes fueron:



- Se comprobó la correlación entre la medida proporcionada por los ultrasonidos y la deformación longitudinal medida. Por ello los autores estimaron que la medida a través de ultrasonidos es un método adecuado para la detección de fisuras.
- En los ensayos realizados a carga rápida se comprobó la formación de microfisuras a bajos niveles de carga ( $0.2-0.38 f_{ct}$ ), lo que introduce un quiebro en el diagrama tensión-deformación. Alrededor de  $0.68-0.78 f_{ct}$  se suele producir una segunda fase de fisuración. El comportamiento hasta este punto es sensiblemente lineal en cada tramo. Finalmente, para niveles de tensión más elevados se produce una incurvación de la ley hasta la rotura. Esta última fase está gobernada por la propagación de las fisuras en la matriz de pasta de cemento.
- La resistencia a tracción diferida es aproximadamente lineal respecto al tiempo expresado en escala logarítmica (ley de Kachanov).

### 2.3.3.3. Lydon y Balendran (1980)

La investigación realizada (LYDO80) comprende ensayos de determinación de la resistencia a tracción uniaxial. Se diseñó tipo de probeta recrecida en los extremos, para poder sujetarla mecánicamente durante el ensayo

Se realizó un control de la fisuración mediante ultrasonidos. También se efectuaron ensayos de presurización con nitrógeno, consistente en la aplicación de gas a presión sobre la superficie lateral de la probeta, lo que induce una rotura por hendimiento. Uno de los objetivos de este ensayo era establecer una correlación entre ambos tipos de ensayo.

Los materiales ensayados fueron hormigones convencionales, y hormigones ligeros de diferentes dosificaciones. Se emplearon dos áridos ligeros: un tipo fabricado a partir de cenizas volantes sinterizadas (Lytag), el segundo tipo a partir de cenizas volantes y clinker sinterizadas (Taclite).

Entre las conclusiones obtenidas de estos ensayos resaltan:

- Las resistencias a tracción directa obtenidas a los 7 días para los hormigones ligeros no superaron los 3.5-4 MPa. La resistencia a tracción del hormigón convencional fue de aproximadamente 4.6 MPa.
- El ensayo de presurización por nitrógeno demostró una gran eficacia y facilidad de empleo. Por ello los autores señalaron su adecuación a la ejecución "in situ".
- Hasta el 65-70% de la resistencia a tracción, el hormigón presentaba un comportamiento sensiblemente lineal y un impulso ultrasónico constante. A partir de este punto, aumentaba la curvatura y variaba el impulso ultrasónico.
- La capacidad deformacional obtenida para las dos clases de hormigón, en el ensayo uniaxial se puede resumir en las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}\epsilon_1 &= 18f_{ct} + 49, 1.0 \leq f_{ct} \leq 4.0 && \text{para el hormigón ligero} \\ \epsilon_1 &= 19f_{ct} + 5, 2.0 \leq f_{ct} \leq 4.5 && \text{para el hormigón convencional}\end{aligned}$$

donde:

$\epsilon_1$  deformación máxima a tracción (mm/m)  
 $f_{ct}$  resistencia a tracción del hormigón (MPa)

### 2.3.3.4. Fouré (1985)

Bernard Fouré (FOUR85a, FOUR85b) publicó en el año 1985 un resumen de la experimentación llevada a cabo acerca de los fenómenos de cansancio a compresión y a tracción. Los hormigones ensayados eran hormigones convencionales de resistencia normal y alta resistencia, y hormigones ligeros. Estos últimos estaban fabricados con arcilla expandida y arena natural en proporciones similares a las de las dosificaciones estudiadas en este trabajo, si bien con cemento de propiedades medias.

Las probetas ensayadas a tracción y a compresión eran de 100×100 mm de sección transversal, exceptuando las de hormigón de alta resistencia, de 100×70 mm. Las velocidades de ensayo fueron de 0.33 MPa/s para ensayos de compresión, excepto en HAR que fue de 0.23 MPa/s. La velocidad de ensayo a tracción fue de 0.04 MPa/s.

La edad más temprana de aplicación de carga constante fue de 3 días, inmediatamente tras la finalización del período de curado, a una temperatura entre 15 y 20 °C.

Las conclusiones a que llega el autor, para estos tipos de hormigones son:

1. Se dedujeron unas leyes empíricas que describen el fenómeno de rotura diferida, independientes de la edad de carga (se realizaron ensayos con edades de carga entre 3 y 28 días).
2. Las leyes deducidas son independientes de la resistencia del hormigón, del tipo de cemento empleado, de la dosificación del hormigón y de la presencia eventual de adiciones destinadas a mejorar la resistencia de los hormigones.
3. Las leyes empíricas plantean una relación lineal entre  $\frac{\sigma_u}{f(t_0 + d_u)}$  y  $\log(d_u)$ , donde el significado de las variables es:

$\sigma_u$       tensión aplicada instantáneamente a la edad de  $t_0$ , mantenida constante hasta rotura

$t_0$       edad en el momento de la puesta en carga de la probeta, días

$d_u$       duración de la probeta sometida a tensión constante  $\sigma_u$  aplicada a la edad de  $t_0$ , días

4. La relación planteada es diferente para hormigones convencionales y para hormigones ligeros, si bien se postula la misma relación para tensiones de tracción y de compresión, basada en los resultados experimentales obtenidos por el autor.
5. Las conclusiones precedentes son válidas para hormigones sometidos a un proceso de curado húmedo, seguido de una conservación en condiciones ambientales o en clima controlado, y siempre y cuando la resistencia normalizada del hormigón aumente con la edad a lo largo del período de aplicación de la tensión constante. Las leyes deducidas no son válidas en caso de pérdida de resistencia instantánea a lo largo del período de actuación de la carga diferida, debida a fuertes contracciones de la masa de hormigón o microfisuración inducida por gradientes de humedad importantes.



Las leyes que se plantean para cada tipo de hormigón se pueden resumir en la Tabla 2.3.3.4-1:

Tabla 2.3.3.4-1

	Hormigón convencional y de alta resistencia a compresión y a tracción	Hormigón ligero a compresión y a tracción
Límite superior	$\frac{\sigma_u}{f(t_0 + d_u)} = 0.95 - 0.030 \log(d_u)$	$\frac{\sigma_u}{f(t_0 + d_u)} = 0.93 - 0.036 \log(d_u)$
Límite inferior	$\frac{\sigma_u}{f(t_0 + d_u)} = 0.89 - 0.033 \log(d_u)$	$\frac{\sigma_u}{f(t_0 + d_u)} = 0.87 - 0.039 \log(d_u)$
Valores medios	$\frac{\sigma_u}{f(t_0 + d_u)} = 0.92 - 0.0315 \log(d_u)$	$\frac{\sigma_u}{f(t_0 + d_u)} = 0.90 - 0.0375 \log(d_u)$

## 2.4. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA ADHERENCIA

Los métodos de evaluación de la adherencia se pueden clasificar en:

- Ensayos realizados en probeta: en este documento se denomina así a los ensayos en los que se confeccionan probetas con la armadura embebida, bien previamente tesada (el mismo pórtico o el encofrado actúan de bancada, reteniendo la fuerza de pretensado mientras el hormigón adquiere resistencias), o bien sin tensión previa (por ejemplo, el ensayo “Moustafa pull-out”). Las probetas fabricadas tienen dimensiones relativamente reducidas. Durante el hormigonado el cordón puede estar situado verticalmente (posición favorable respecto a la adherencia) u horizontalmente (posición desfavorable). En estos ensayos se trata de caracterizar el comportamiento adherente en elementos a pequeña escala, mediante la simulación de la transferencia (sólo pretensado con tensión), o simulación del comportamiento en servicio, mediante el ensayo “pull-out”.
- Ensayos de fabricación de prismas pretensados: Se trata de fabricar elementos pretensados a escala, con pretensado centrado consistente en uno o más cordones de pretensado. Se les denomina así en este documento, en contraposición a las vigas pretensadas, de pretensado excéntrico. Durante la fabricación se instrumentan las deformaciones a lo largo de los paramentos laterales, a fin de determinar la longitud de transmisión. La geometría de estos elementos no permite la realización de ensayos de anclaje a flexión.
- Ensayos de vigas pretensadas a flexión: El proceso consiste en la fabricación e instrumentación de vigas pretensadas a escala. Durante la fabricación se suele medir la longitud de transmisión, mediante el mismo procedimiento que en los prismas de pretensado. Transcurrido un cierto tiempo, las vigas se ensayan a flexión de forma estática o dinámica, aplicando cargas concentradas según una configuración isostática. La distancia entre las cargas aplicadas y los extremos condiciona la forma de rotura de la viga: si la distancia es inferior a la longitud de anclaje, se producirá un fallo por adherencia prematuro; si la distancia es mayor, la viga alcanzará su capacidad resistente nominal.

- Ensayo de vigas reales, procedentes de la fabricación habitual. Este método, debido a su elevado coste sólo se emplea cuando se producen patologías, para evaluar el daño comparativamente a vigas no dañadas; o como último paso en la investigación de nuevos materiales o procedimientos de fabricación.
- Métodos analíticos o numéricos, empleados junto con los experimentales para predecir las tensiones en los elementos pretensado, la posibilidad de fisuración o para sistematizar las secuencias de transferencia de pretensado. La complejidad del fenómeno estudiado conlleva el predominio de los métodos numéricos.

En este apartado se resumen las investigaciones más relevantes, a nuestro juicio, sobre los diversos tipos de métodos enunciados. Finalmente se resumen los factores identificados por los diversos autores, que condicionan la adherencia.

#### **2.4.1. ENSAYOS DE ADHERENCIA REALIZADOS EN PROBETA**

##### **2.4.1.1. Tulin y Al-Chalabi (1969)**

El estudio (TULI69) se centra en la adherencia de la zona de transmisión, a través de ensayos “pull-out” sobre probetas cilíndricas de 15×74 cm. El cordón de pretensado es de acero de Grade 270, 0.5” de diámetro, tesado a un máximo del 74% de la carga unitaria máxima. Las probetas se hormigonaban horizontalmente, tras haber tesado el cordón de pretensado centrado, a pesar de la forma cilíndrica del molde.

Las variables de la investigación fueron la tensión de tesado y las diferentes dosificaciones de hormigón, ajustadas para proporcionar a los 7 días de edad 35 MPa aproximadamente.

La transferencia gradual de pretensado se realizaba a los 7 días, sin haber desmoldado previamente la probeta, tras haber colocado una cuña en la parte exterior de la base del molde, para evitar, según el autor, la transferencia de pretensado en esa parte de la probeta. Seguidamente se disponía la probeta en la máquina de ensayos, con la placa base y cuña orientadas a la parte superior, y se comenzaba el ensayo de “pull-out” traccionando desde la parte inferior.

De entre las conclusiones destacan:

- La tensión de adherencia obtenida disminuye cuando se aumenta la cantidad de cemento en la mezcla.
- Una disminución de la fuerza de pretensado conlleva un aumento de la tensión de adherencia.

#### **Discusión**

Realmente, cabe la duda de cuánto pretensado retiene la parte central de la probeta de 74 cm de longitud, dado que se transfiere el pretensado antes de realizar en ensayo “pull-out”. Por otra parte, el ensayo de “pull-out” no refleja las condiciones de trabajo de la zona de transmisión, objeto de estudio en esta investigación. Resulta paradójico que se empleasen probetas cilíndricas para hormigonado horizontal.



### 2.4.1.2. Tilanterä y Rechart (1977)

Los autores (TILA77) resumen las investigaciones llevadas a cabo en la Universidad de Helsinki, en el marco de un proyecto de investigación relacionado con el uso estructural del hormigón ligero.

Se investigó la adherencia entre los diversos tipos de hormigón y armadura pasiva de varias clases, y cordones de pretensado de 12.7 mm de diámetro mediante ensayos “pull-out” sin tensión previa.

Los materiales investigados fueron hormigones convencionales y ligeros de 20 y 40 MPa de resistencia de proyecto. El hormigón ligero de 40 MPa contenía un 25% de árido convencional, sin que se especifique su granulometría y un 75% de arcilla expandida. La densidad de este hormigón era de 1.73, la resistencia a tracción indirecta 2.33 MPa y el contenido de cemento de 520 kg/m<sup>3</sup>. La relación agua/cemento empleada fue 0.41 para el hormigón ligero y 0.53 para el hormigón convencional.

Se efectuaron cuatro ensayos “pull-out” y un ensayo “beam test” por cada tipo de hormigón y cada tipo de armadura. Los ensayos “pull-out” se efectuaron sobre cordones sin tensión. En los ensayos “pull-out” se varió el recubrimiento.

La longitud adherente del ensayo “beam-test” con cordones de pretensado era de 10 diámetros, situados en el centro de cada semiviga.

La comparación entre el comportamiento de cada material se realizó a partir de los valores de tensión máxima obtenida, y la tensión correspondiente a un deslizamiento de 0.025 mm. El estudio se realizó de forma comparativa entre los hormigones ligeros y los convencionales, puesto que, según los autores, los valores de tensión máxima de adherencia que se obtienen a partir de estos ensayos son más elevados que los de las normativas.

Los resultados obtenidos para cordón de pretensado se resumen en la Tabla 2.4.1.2-1.

Tabla 2.4.1.2-1

	$\frac{\tau_{b,HL,0.025}}{\tau_{b,HC,0.025}}$	$\frac{\tau_{b,HL,m\acute{a}x}}{\tau_{b,HC,m\acute{a}x}}$
Ensayo “pull-out”	1.37	1.38
Ensayo “beam-test”	0.82	1.03

donde:

$\tau_{b,HC,0.025}$	tensión de adherencia del hormigón convencional correspondiente a un deslizamiento de 0.025 mm
$\tau_{b,HL,0.025}$	tensión de adherencia del hormigón convencional correspondiente a un deslizamiento de 0.025 mm
$\tau_{b,HC,m\acute{a}x}$	tensión de adherencia máxima del hormigón convencional
$\tau_{b,HL,m\acute{a}x}$	tensión de adherencia máxima del hormigón ligero

Se aprecia una capacidad adherente máxima superior en el caso del hormigón ligero, para los dos tipos de ensayo. Sin embargo, la capacidad adherente correspondiente al deslizamiento de 0.025 mm es superior para el hormigón ligero en el ensayo “pull-out”, e inferior en el caso del ensayo “beam-test”.

Según los autores, en los ensayos de “pull-out” sobre cordón sin tensión el giro del cordón es libre. Sin embargo, en el “beam-test” el giro del cordón está impedido, por lo que se produce un efecto de adherencia mecánica y rozamiento. La capacidad adherente del ensayo “beam-test” resultó un 44% superior para el hormigón convencional y tan sólo un 7% superior para el hormigón ligero. La capacidad adherente del hormigón convencional en este ensayo es superior debido al efecto cuña de las partículas de árido convencional, superior al del hormigón ligero.

De entre las conclusiones de los autores destacan:

- Los autores obtuvieron una correlación entre la tensión de adherencia máxima y la relación agua/cemento a partir de los ensayos “pull-out”, independiente del tipo de material, que para el caso de cordón de pretensado es:

$$\tau_{b,MAT,m\acute{a}x} = -10w + 11.8$$

donde:

$\tau_{b,MAT,m\acute{a}x}$	tensión de adherencia máxima del hormigón convencional
$w$	relación agua/cemento

- Los autores defienden que la longitud de anclaje del hormigón ligero pretensado es similar a la correspondiente al hormigón convencional, por lo que juzgan innecesario el aumento de longitud de anclaje propuesto por el CEB.

### Resumen crítico

- En los ensayos realizados no se tiene en cuenta la adherencia de la zona de transmisión. Dadas las condiciones de los ensayos realizados, parece que los valores de tensión de adherencia describen mejor el comportamiento de la zona complementaria a tracción.
- Parece aventurada la conclusión relativa a la longitud de anclaje del pretensado: los ensayos se efectúan sobre cordón sin tensión, por lo que no se tiene en cuenta el efecto Hoyer; además, el que la capacidad adherente sea superior en el caso del hormigón ligero, no se estudia el efecto de la posible fisuración en la zona de anclaje debida a tensiones excesivas.
- Es interesante la correlación obtenida entre la relación agua-cemento y la capacidad adherente.
- El efecto de giro permitido/coartado en la adherencia, postulado por los autores explica las diferencias de comportamiento adherente en los diferentes ensayos.

#### 2.4.1.3. Brearley y Johnston (1990)

Los autores (BRE90) presentan los resultados de los ensayos de “pull-out” sobre cordón de pretensado sin tensión previa, realizados con probetas fabricadas junto con



las vigas de Cousins y Johnston (COUS86b), con el mismo material, para poder comparar los resultados de los diferentes tipos de ensayo.

Las probetas prismáticas tenían unas dimensiones de 203×203×305 mm. El hormigonado se llevó a cabo con el cordón de pretensado centrado y horizontal, sin tensión.

El ensayo se realizó con ayuda de un gato de pretensado y relojes comparadores para evaluar los deslizamientos.

Los resultados obtenidos presentan la misma tendencia que los resultados de Cousins, pero las tensiones de adherencia medias determinadas difieren considerablemente de las obtenidas en los ensayos de Cousins et al. (COUS90b).

#### **2.4.1.4. Abrishami y Mitchell (1993)**

Abrishami y Mitchell (ABRI93) presentaron un nuevo enfoque para el estudio de las propiedades de adherencia de un cordón de pretensado en las zonas de transmisión y de anclaje de la fuerza de pretensado. Para ello emplearon el mismo pórtico que utilizaron en una investigación anterior, acerca de la adherencia de la armadura pasiva (ABRI92).

La novedad del método planteado es la posibilidad de determinar la tensión de adherencia de una manera más directa, a través de la medida de la tensión del cordón de pretensado, en vez de medir las deformaciones del cable o del hormigón en vigas, como es lo habitual.

La forma de aplicación de la carga permite además el estudio de la relación tensión de adherencia-deslizamiento en la fase postcrítica, cuando ya se ha producido el fallo de la adherencia, puesto que el sistema de carga es el mismo que el utilizado para simular tensión de adherencia uniforme del apartado anterior. El método experimental planteado por Abrishami y Mitchell permite la evaluación de:

- La tensión máxima de adherencia que se puede desarrollar en la zona de transmisión de un elemento pretensado, puesto que se simula la transferencia de pretensado.
- La tensión máxima de adherencia que se puede desarrollar en la zona complementaria a tracción de un elemento de hormigón pretensado, puesto que se simula el aumento de tensión que se produce durante la puesta en carga.

##### **2.4.1.4.1. Simulación del comportamiento adherente de la zona de transmisión de la fuerza de pretensado**

Mediante este ensayo se simula la transmisión de la fuerza de pretensado, siguiendo el proceso siguiente:

1. Se tesa el cordón de pretensado con una fuerza  $P_0$  en un pórtico de carga.
2. Se hormigona una probeta cilíndrica alrededor del cordón de pretensado.
3. Se cura el hormigón, y se espera hasta que adquiriera la resistencia prefijada para poder transferir la fuerza de pretensado, momento en que comienza el ensayo.
4. El ensayo propiamente dicho consiste en reducir la fuerza del cordón en la parte superior a la probeta en  $\Delta P_t$  (véase la Figura 2.4.1.4.1-1). La diferencia de tensión a

que queda sometido el pretensado es equilibrada por la reacción de la placa de apoyo de la probeta, que origina una compresión de la parte inferior de la probeta.

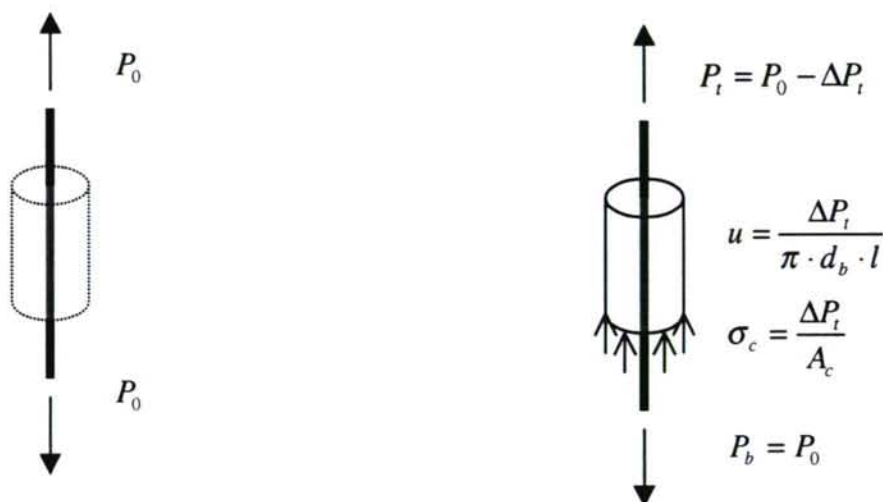


Figura 2.4.1.4.1-1: Esquema del ensayo de simulación de la longitud de transmisión

La tensión de adherencia media generada vale:

$$u = \frac{\Delta P_t}{\pi \cdot d_b \cdot l}$$

La tensión de compresión generada en la base de la probeta vale:

$$\sigma_c = \frac{\Delta P_t}{A_c}$$

donde:

$P_0$	fuerza inicial del cordón de pretensado, antes del inicio del ensayo
$P_t$	fuerza del cordón en la parte superior de la probeta
$P_b$	fuerza del cordón en la parte inferior de la probeta
$A_c$	área de la sección de hormigón de la probeta
$\sigma_c$	tensión de compresión en la probeta
$\Delta P_t$	variación de fuerza del cordón en la parte superior de la probeta
$\Delta P_b$	variación de fuerza del cordón en la parte inferior de la probeta

- Este proceso se repite sucesivamente hasta que se produce el fallo por adherencia, o se transfiere la totalidad de la fuerza de pretensado  $P_0$  a la probeta.

Durante este proceso se controlaban los siguientes parámetros:

- Tensión en la parte superior e inferior del pretensado mediante células de carga huecas.



- Deslizamiento relativo del cordón de pretensado respecto a las caras superior e inferior de la probeta, mediante transductores de desplazamiento.

#### 2.4.1.4.2. Simulación del comportamiento adherente de la zona de anclaje de la fuerza de pretensado

Para simular las propiedades de adherencia de la zona de anclaje, el proceso seguido coincide con el del apartado anterior hasta el apartado 3 incluido, continuando como sigue:

4. Se incrementa la fuerza del cordón en la parte inferior a la probeta en  $\Delta P_b$  (véase la Figura 2.4.1.4.2-1). La diferencia de tensión a que queda sometido el pretensado es equilibrada por la reacción de la placa de apoyo de la probeta, que origina una compresión en la parte inferior de la probeta de resultante  $\Delta P_b$ .

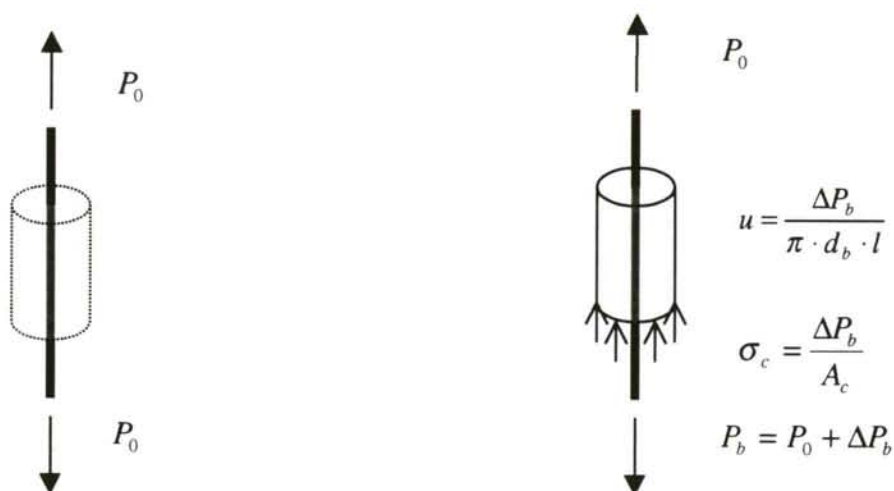


Figura 2.4.1.4.2-1

La tensión de adherencia media es de:

$$u = \frac{\Delta P_b}{\pi \cdot d_b \cdot l}$$

La tensión de compresión originada en la base de la probeta es de:

$$\sigma_c = \frac{\Delta P_b}{A_c}$$

5. Este proceso se repite sucesivamente hasta que se produce el fallo por adherencia, o se alcanza una tensión en el cordón de pretensado próxima al límite elástico.

Durante este proceso se controlaban los siguientes parámetros:

- Tensión en la parte superior e inferior del pretensado mediante células de carga huecas.

- Deslizamiento relativo del cordón de pretensado respecto a las caras superior e inferior de la probeta, mediante transductores de desplazamiento.

#### **2.4.1.4.3. Resultados del estudio de la zona de transmisión**

- El cordón de pretensado se tesó inicialmente a  $0.7f_{pu}$ . Durante el ensayo, la tensión de la parte superior del cordón se redujo en  $\Delta P_t$ , lo que motivó una ligera reducción de la tensión del cordón en la parte inferior del cordón.
- En la parte superior de la probeta se registró durante todo el ensayo un aumento del deslizamiento relativo. Antes de producirse el fallo de la adherencia no se detectó deslizamiento alguno del cordón en la parte inferior de la probeta.
- Durante el ensayo, antes de producirse el fallo, la tensión de adherencia se mantuvo sensiblemente lineal respecto al deslizamiento de la parte superior del cordón, hasta alcanzar un valor máximo (7.5 MPa de media), que corresponde al agotamiento por adherencia.
- En la etapa post-crítica, la tensión de adherencia se redujo considerablemente, y los deslizamientos de la parte superior e inferior del cordón se igualaron, lo que implica el deslizamiento del cordón a través de la probeta, característico de una rotura por arrancamiento.
- En los ensayos realizados todos los fallos de adherencia que se produjeron fueron por arrancamiento del cordón, y ninguno por hendimiento del hormigón. No se observó ninguna fisura superficial en ninguna de las probetas.

#### **2.4.1.4.4. Resultados del estudio de la zona de anclaje**

- El cordón de pretensado se tesó inicialmente a un porcentaje de la fuerza de pretensado máxima,  $\alpha f_{pu}$ . Durante el ensayo, la tensión de la parte inferior del cordón se incrementó en  $\Delta P_b$ , lo que motivó un ligero aumento de la tensión del cordón en su parte superior.
- Durante el proceso de carga se detectó el aumento del deslizamiento de la parte inferior del cordón respecto de la probeta. Antes de alcanzarse la tensión de adherencia máxima (cuyo valor medio fue de 3.9 MPa), se constató el inicio del deslizamiento de la parte superior del cordón de pretensado.
- A pesar del gran deslizamiento generalizado del cordón que se produce tras el fallo de la adherencia por “pull-out”, se comprobó la existencia de una tensión de adherencia residual considerable.

#### **2.4.1.4.5. Conclusiones de los autores**

Entre las conclusiones de los autores de estos ensayos, destacamos:

- La técnica desarrollada proporciona un método sencillo para determinar las características adherentes de la zona de transmisión y de la zona de anclaje, que



supone una alternativa al ensayo tradicional en vigas pretensadas, midiendo la variación de deformaciones en el cordón y en la superficie del elemento ensayado.

- El control del ensayo se realiza por deformaciones, a través de un dispositivo de roscas, lo que posibilita el análisis de la fase post-crítica.
- La tensión máxima de adherencia es superior en la zona de transmisión que en la zona de anclaje, para el mismo tipo de cordón, embebido en probetas de las mismas características, siendo la relación entre estos valores de 2/3 en el caso de cordón de 16 mm.
- En la fase infracrítica, en la simulación de la zona de transmisión no se detecta ningún deslizamiento del cordón respecto a la parte inferior de la probeta (extremo pasivo en este ensayo). Para esta misma fase, en la simulación de la zona de anclaje se empieza a detectar deslizamiento del cordón respecto a la parte superior de la probeta (la zona pasiva en este caso).
- Antes de producirse el agotamiento por adherencia, el comportamiento de la zona de transmisión es prácticamente lineal, mientras que la zona de anclaje presenta una curvatura apreciable.
- Tras el fallo por adherencia, la zona de anclaje presenta un comportamiento más dúctil, con un valor de la tensión de adherencia prácticamente constante.

#### **2.4.1.4.6. Discusión**

- El ensayo de Abrishami y Mitchell supone un avance en el estudio de las propiedades adherentes del pretensado, por cuanto introduce la aplicación de un ensayo “pull-out” a una probeta pretensada, y no a una probeta simplemente armada con un cable.
- Los autores no justifican por qué adoptan valores iniciales de tensión en el cordón de pretensado tan bajos (ABRI93), tanto en los ensayos LT como para el ensayo LC.
- No se especifican velocidades de ensayo, que den idea de los gradual/súbito que es el proceso.
- A pesar de la incertidumbre de la superficie en contacto del cordón de pretensado y el hormigón, se determinan tensiones de adherencia. No se justifica qué perímetro se adopta para su determinación, se supone que el correspondiente al diámetro nominal del cordón. La variable de los ensayos de Abrishami es el diámetro del cordón de pretensado. Por ello estiman las tensiones de adherencia, para poder comparar entre diferentes tipos de cordón.
- Se considera que el ensayo ha finalizado cuando se produce deslizamiento generalizado, sin que se evalúen tensiones remanentes de adherencia a partir de ese instante.
- Los ensayos se realizan de manera instantánea, es decir, no se mantienen diferencias de fuerza entre ambos extremos de la probeta a lo largo de cierto período de tiempo.

- Generalmente el pretensado se coloca horizontalmente, por lo que la dirección del hormigonado en elementos pretensados es perpendicular al trazado de los tendones. Sin embargo, en los ensayos de Abrishami-Mitchell el cordón está vertical, por lo que ambas direcciones coinciden, lo que motiva que las condiciones adherentes sean mejores. De esta forma, se sobrestiman las propiedades adherentes respecto a las que se van a tener en realidad.
- La sección transversal de la probeta es circular, lo que no es habitual en elementos pretensados. Por otra parte, la simetría axial facilita la aplicación de modelos analíticos y numéricos.
- Los ensayos planteados se realizan para un solo cordón de pretensado. En elementos pretensados generalmente hay múltiples cordones de pretensado próximos entre sí, cuya interacción no tienen en cuenta los ensayos planteados.
- La forma de aplicación de la carga produce una compresión en el hormigón de la probeta, lo que mejora las propiedades adherentes de la misma. En la zona de la sección donde está situado el pretensado en elementos reales en situaciones de servicio (las que se pretenden simular con el ensayo de la zona de anclaje) las compresiones en el hormigón que rodea el pretensado pueden reducirse hasta anularse, o incluso cambiar de signo.

#### 2.4.1.5. Rose y Russell (1997)

El objetivo de la investigación llevada a cabo en la Universidad de Oklahoma (ROSE97) es la búsqueda de un ensayo normalizado para evaluar la capacidad adherente de cordones de pretensado. Para ello, los autores realizaron:

- Ensayos “pull-out” sobre cordones sin tensión: ensayo Moustafa.
- Ensayos de transferencia en probeta, con cordones previamente tesados en posición horizontal. En estos ensayos se transfiere gradualmente la fuerza de pretensado desde uno de los extremos de la probeta. La probeta presenta una sección cuadrada de 140 mm de lado, y 305 mm de longitud (véase la Figura 2.4.1.5-1).
- Vigas pretensadas con dos cordones de pretensado excéntricos.

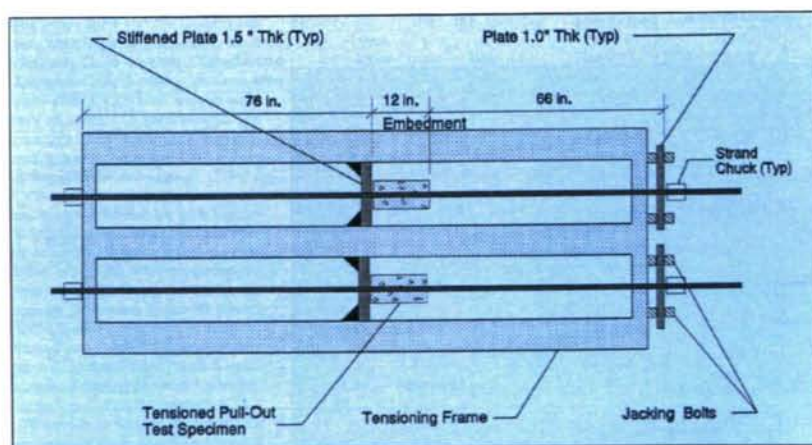


Figura 2.4.1.5-1: Esquema de transferencia en probeta (ROSE97)



La variable en estos ensayos es el estado superficial de cordones de pretensado de 0.5" de diámetro nominal, de Grade 270 y baja relajación, de diferentes fabricantes.

Las conclusiones a que llegaron son:

- La correlación entre los resultados de los ensayos "pull-out" de Moustafa y los valores obtenidos para la longitud de transmisión en vigas pretensadas es adecuada. Además, este ensayo es fácil de realizar.
- El autor recomienda la realización de campañas de ensayo adicionales, según un procedimiento de ensayo fijado de antemano: velocidad de ensayo, dimensiones geométricas de la probeta y dosificación del hormigón prefijadas.
- El autor señala la buena correlación entre las longitudes de transmisión medidas y la penetración del pretensado. De hecho, invita a los prefabricadores a desarrollar un ensayo de determinación de la penetración de pretensado.
- Los ensayos de "pull-out" realizados sobre cordones pretensados no presentan buena correlación con los resultados de las vigas pretensadas. Además, el ensayo reviste una gran dificultad en su realización. Por ello, el autor la desaconseja.
- La velocidad de realización del ensayo Moustafa es determinante en los resultados obtenidos. A consecuencia de esta campaña de ensayos se sistematizó el ensayo Moustafa (procedimiento de ensayo Moustafa, PCI96a y PCI96b).
- Se midió la penetración de pretensado tras la transferencia, y hasta los 21 días siguientes, constatando aumentos de la penetración de un 10% de media con el tiempo.

## Discusión

El método de ensayo de transferencia en probeta, con cordones previamente tesados no está suficientemente descrito en el artículo. Según los mismos autores, el ensayo planteado no presenta la facilidad inherente a los ensayos de Abrishami-Mitchell. Por otra parte, no se realizó simulación del comportamiento de la longitud complementaria a tracción.

### 2.4.1.6. Sharaf (1999)

La investigación llevada a cabo (SHAR99) tiene como finalidad el estudio de la adherencia entre el hormigón y las armaduras pasivas y activas, en concreto se analiza la influencia de la fisuración longitudinal en la capacidad adherente de los elementos de hormigón armado y pretensado.

Se realizaron ensayos experimentales sobre probetas prismáticas. Los ensayos con armadura activa se realizaron con alambres de pretensado. Las variables estudiadas fueron la profundidad de grafil y el recubrimiento de las probetas. El ensayo realizado consistía en la fabricación de las probetas prismáticas, de sección transversal rectangular, hormigonadas horizontalmente en un molde-bastidor, contra el que previamente se había tesado el alambre. Tras el período de curado y endurecimiento, se colocaba el bastidor en la máquina de ensayos. Tras un proceso de transferencia de la fuerza de pretensado inicial a la máquina de ensayos, se procedía a transferir gradualmente la fuerza de pretensado de la probeta. La longitud de la probeta era de 400 mm. Durante la transferencia se medía el deslizamiento relativo hormigón-alambre, la abertura de fisuras y el acortamiento longitudinal medio de la probeta.



El autor desarrolló un modelo numérico, mediante el empleo del programa Abaqus. Para la modelización de la fractura del hormigón se empleó un modelo de fisura cohesiva. Para ello se programó un modelo intercara con las leyes constitutivas tensión-adherencia y función de ablandamiento del material. El modelo contempla la dilatación debida a la abertura de las grietas. El modelo bidimensional se desarrolla a escala de barra, en sentido longitudinal. En el contacto entre el hormigón y el alambre se tienen en cuenta las tensiones normales,  $\sigma$  y tangenciales,  $\tau$ . Se define una superficie de rotura,  $F(\sigma, \tau) = 0$ , por analogía a la plasticidad clásica. A partir de la condición de rotura se define la función de reblandecimiento. Los parámetros del modelo son la cohesión, el ángulo de fricción entre el hormigón y el alambre, la resistencia normal al eje del alambre, el ángulo de dilatación y la energía de fractura. Se compararon los resultados del modelo con las curvas obtenidas de los ensayos. Los parámetros del modelo se ajustaron a los resultados de los ensayos. El análisis se realizó empleando un proceso incremental en el tiempo.

Durante la realización de los ensayos, se apreció una fisuración longitudinal más acusada cuanto menor era el recubrimiento. A mayor profundidad de grafilas se apreció una mayor abertura de fisura. Se señala que la probabilidad de fisuración y la abertura de fisura aumentan cuanto mayor es la profundidad de grafilas.

El modelo numérico propuesto permite simular la transferencia de pretensado en elementos pretensados con pretensado centrado. El modelo contempla la fisuración longitudinal, y su efecto en la adherencia entre el hormigón y el pretensado. Los autores concluyen que el modelo presentado predice adecuadamente los resultados experimentales, y que se basa en parámetros físicos que se pueden medir experimentalmente. El modelo contempla el efecto Hoyer, y permite relacionar las tensiones radiales y tangenciales con los desplazamientos relativos hormigón-armadura.

#### **2.4.2. INVESTIGACIÓN SOBRE LA LONGITUD DE TRANSMISIÓN EN VIGA**

Durante los últimos años ha habido una gran cantidad de publicaciones relativas a la adherencia. Las causas son:

- Por una parte, la controversia suscitada con los cordones convencionales de 0.5" y 0.6", explicada anteriormente.
- El creciente empleo de cordones recubiertos de mortero epoxi, que proporcionan una seguridad adicional respecto a la durabilidad.
- La aparición en el mercado de diversos tendones de materiales no metálicos de diversos tipos.

Existen tres métodos de determinación de la longitud de transmisión a partir de la ley experimental de deformaciones del hormigón en el paramento, a la altura del c.d.g. del pretensado (véase Figura 2.4.2-1):

- El primer método consiste en la determinación del valor medio de deformación del hormigón en la parte central, sensiblemente horizontal. El punto donde la recta horizontal correspondiente al valor medio calculado interseca al final de la rama ascendente desde cada extremo es el final de la longitud de transmisión. A este



método le denominaremos “método del 100% de la deformación constante” (FHWA94).

- El segundo método consiste en la determinación del valor medio de deformación del hormigón en la parte central, sensiblemente horizontal. El punto donde la recta horizontal correspondiente a un porcentaje del valor medio  $X$  (90% o 95% habitualmente) intersecte al final de la rama ascendente desde cada extremo es el final de la longitud de transmisión. A este método le denominaremos “método del  $X\%$  de la deformación constante” (FHWA94).
- El tercer método consiste en ajustar una recta de regresión a cada zona de deformación creciente desde el extremo, y determinar la intersección con la recta horizontal definida por el valor medio de las deformaciones de la zona central (planteado por C. Chong Key en su tesis doctoral) (CHON91). A este método lo denominaremos “método del ajuste de pendiente”.

En este apartado se resumen algunas de las investigaciones más recientes de estos temas.

#### 2.4.2.1. Chandler (1990)

El autor (CHAN90) postula la conveniencia de establecer una relación entre la longitud de transmisión y la penetración del pretensado en los extremos, como método de control de la adherencia en fábrica.

El objetivo de la investigación llevada a cabo es investigar la posibilidad de formación de fisuras en los extremos de la viga durante la transferencia de pretensado; establecer qué factores condicionan el desarrollo de las mismas y dilucidar si estas fisuras influyen en la capacidad resistente de las vigas.

En este artículo se hace referencia a un caso de fisuración diferida en el extremo de la viga, del tipo que en este documento denominamos fisuración por hendimiento. Se constata que, tras producirse la fisuración por hendimiento la penetración aumenta de 1.11 a 1.55 mm. La fisura no se extendió a toda la longitud del elemento.

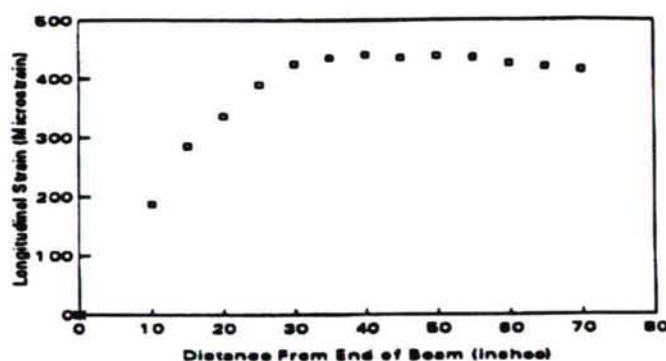
El autor señala la relación entre valores de longitud de transmisión bajos y la tendencia a fisurar por hendimiento.

Entre las conclusiones destacan:

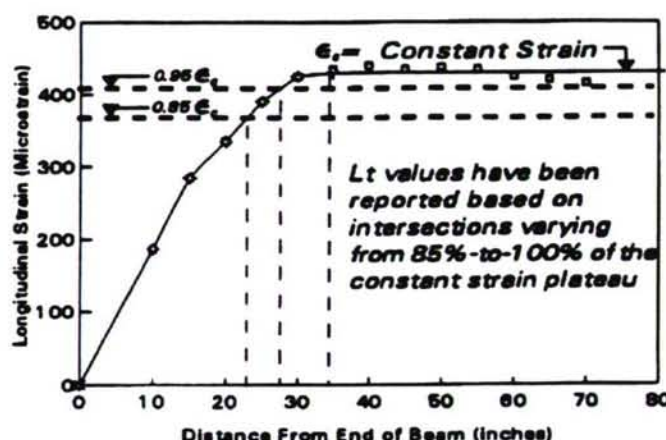
- La causa de grandes deslizamientos y grandes longitudes de transmisión es la falta de adherencia o la aparición de fisuras por hendimiento.
- El autor propone una correlación lineal entre la longitud de transmisión y la penetración, del tipo:

$$L_p = K_0 \Delta_0$$

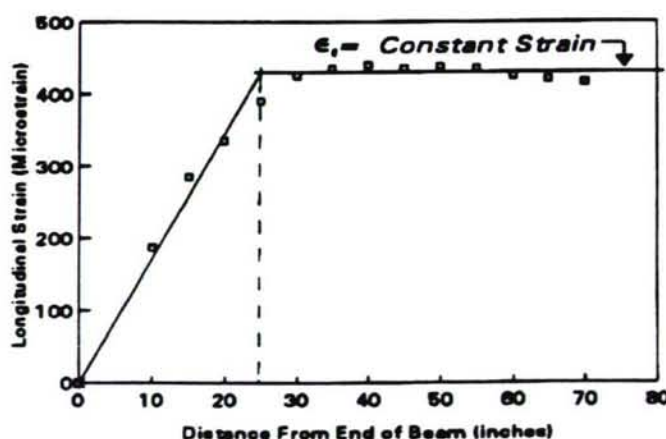
siendo  $K_0 = 400$  un valor orientativo para 12.7 y 15.2 mm de diámetro. Para cordones próximos (distancia entre ejes menor de 5 diámetros) propone  $K_0 = 300$ .



**a. Typical measured strain profile.**



**b. Transfer length based on fraction of constant strain.**



**c. Transfer length based on slope-intercept concept.**

1 in = 25.4 mm

Figura 2.4.2-1: (FHWA94)

- Se recomienda el control del deslizamiento para detectar falta longitudes de transmisión elevadas: valores altos de penetración implican falta de adherencia o fisuración por hendimiento. Valores de penetración por encima de  $\Delta_0 = 0.14d_b$  implican adherencia deficiente.



#### 2.4.2.2. Nanni, Tanigaki y Koichi (1992)

El desarrollo de nuevos materiales, como los tendones de pretensado no metálicos de plástico reforzado con fibras (FRP), obedece al intento de resolver los problemas de durabilidad relacionados con la corrosión del acero.

Este trabajo se centra en el anclaje por adherencia de tendones de FRP en el elemento de hormigón pretensado (NANN92), con el objeto de garantizar el proceso de transferencia de la fuerza de pretensado.

En un estudio previo (Nanni et al., 1991) dedicado a la evaluación de la longitud de transmisión de los tendones ARPF, fabricados a partir de fibras de aramida en una matriz de epoxi, se detectó fisuración del hormigón de la zona de anclaje al producirse la transferencia de pretensado. La fuerza inicial de pretensado que se aplicó fue de 125 kN, siendo la resistencia del hormigón durante la transferencia de 29 MPa, y el recubrimiento mínimo utilizado de 52 mm. No se dispuso armadura transversal.

A la vista de este hecho, se planeó una nueva campaña de ensayos con el fin de identificar las causas de la fisuración, y plantear soluciones a este problema. Este trabajo expone los resultados de esta nueva investigación.

En el caso de los tendones ARPF la componente de rozamiento en la capacidad adherente es particularmente alta, debido a que:

1. El coeficiente de Poisson de este material no se conoce con certeza, pero para barras trenzadas es del orden de 0.6, y por lo tanto muy superior al del acero.
2. La deformabilidad de los tendones ARPF es mayor que la de los cables de acero. Para las tensiones iniciales de tesado habituales en el acero y en el ARPF, la deformación en los tendones de ARPF es de aproximadamente el doble.

Este efecto de recuperación de la deformación transversal, tan elevado en los tendones ARPF, introduce en el hormigón circundante tensiones radiales muy elevadas, lo que aumenta la probabilidad de fisuración de la zona de anclaje. Las deformaciones diferidas del hormigón tienden a paliar este efecto, por lo que, según los autores, la situación más crítica se produce durante la transferencia.

La transferencia gradual tuvo lugar a los 7 días, cuando la resistencia del hormigón alcanzó 29 MPa.

Por lo que respecta a las deformaciones transversales de tracción en el hormigón, la mayor parte de las vigas presentaron fisuración por hendimiento del hormigón paralela al tendón, a la altura del mismo. La fisuración se produjo durante la transferencia.

Se realizó un análisis mediante elementos finitos de la zona de anclaje, a fin de predecir las tracciones y la fisuración del hormigón debida a la transferencia de pretensado. La carga consistió en una presión interna radial, de valor  $P_0$  en el extremo del elemento correspondiente al final de la viga, variando linealmente a lo largo del cilindro hasta que se anula a una distancia determinada " $l$ ".

## Conclusiones de los autores

De entre las conclusiones extraídas por los autores, destacan las siguientes:

- A causa de las mejores propiedades adherentes de los cordones FRP, se producen tensiones de adherencia elevadas en la zona de transmisión del pretensado, que provocan tensiones de tracción en el hormigón superiores a su resistencia a tracción. De esta forma aparecen fisuras de hendimiento longitudinales, incompatibles con la funcionalidad y durabilidad de la estructura.
- Para evitar la fisuración por hendimiento del hormigón los autores proponen dos medidas preventivas:
  - Rodear los tendones en el extremo de la viga de espirales de FRP, que confinan el hormigón circundante.
  - Recubrir parcialmente los cordones de FRP en la zona extrema, para limitar las tensiones de adherencia. Los autores estiman que el aumento de la longitud de transmisión no supera el 20%.
- Los autores desarrollaron un modelo bidimensional para modelar la zona de transmisión, aplicando axisimetría. Para ello se basaron en la hipótesis de que el hormigón que rodea el cordón de pretensado estuviera parcialmente fisurado. Este modelo se implementó en un programa de elementos finitos, a fin de interpretar los resultados experimentales obtenidos, y predecir el comportamiento de cordones de otros diámetros, lo que se llevó a cabo con buenos resultados.

### 2.4.2.3. Lane (1992)

En este artículo, la autora (LANE92) expone los resultados de la investigación llevada a cabo por la FHWA, a partir del memorándum de 1988. La primera parte de esta investigación comprende la fabricación de prismas de pretensado centrado rectangulares, con uno o cuatro cordones de pretensado, de 3660 mm de longitud. Las dimensiones de la sección transversal de los prismas se determinan para que la tensión de compresión en el hormigón sea del 60% de la carga a rotura antes de pérdidas y del 40% tras pérdidas. Los diámetros de cordón empleados son 0.5 y 0.6". El estudio se centra en cordones estándar y cordones recubiertos de mortero epoxi.

La tensión de tesado es el 75% de la carga unitaria máxima del pretensado.

Las conclusiones parciales más importantes son:

- La longitud de transmisión de los cordones recubiertos de mortero epoxi es menor a la correspondiente a cordones estándar (un 60% inferior).
- La longitud de transmisión aumenta con el diámetro de cordón.
- La longitud de transmisión de prismas con 4 cordones de 9.5 mm y 12.7 mm de diámetro es un 25% superior a la correspondiente a prismas con un solo cordón.
- La longitud de transmisión de prismas con 4 cordones de 0.6" es superior a la mitad de la longitud del prisma, es decir, superior a 1800 mm.



## Discusión

- No se especifica la separación entre cordones para los prismas con 4 cordones concéntricos, ni los recubrimientos adoptados.

### 2.4.2.4. Shahawy, Issa, Batchelor y Barrington (1992)

Los autores (SHAH92) presentan los resultados de la investigación llevada a cabo con vigas AASHTO tipo 2, pretensadas con cordones de 0.5 y 0.6", con separación de 50 mm entre centros de cordón. En parte de las vigas hay cordones de pretensado enfundados.

Los objetivos de la investigación son:

- Determinar la influencia de la separación entre cordones de 50 mm en la zona de transmisión
- Determinar la longitud de transmisión de los cordones de pretensado enfundados, a partir de la sección inicial adherente.

La edad de transferencia fijada es de 48 horas. El período de curado con gel fue de 24 h.

La instrumentación empleada consistía en bandas extensométricas adheridas al pretensado, y puntos de extensometría en las caras laterales de las vigas.

Se dispuso armadura de cortante y armadura de confinamiento en forma de doble estribo, con separación de 76 mm durante los primeros 230 mm, y separación de 150 mm durante los siguientes 610 mm (longitud total de aproximadamente la longitud de transmisión prevista).

Las conclusiones más relevantes de este trabajo son:

- La longitud de transmisión media obtenida es de 762 mm para cordón de 0.5" y de 864 mm para cordón de 0.6".
- La longitud de transmisión para cordones enfundados es la suma de la distancia de enfundado, más la longitud de transmisión correspondiente al diámetro considerado.
- Los autores proponen, basándose en sus resultados experimentales, que la expresión de la longitud de transmisión de la ACI se modifique de la siguiente forma:

$$l_t = l_s + \frac{f_{si}}{3} d_b$$

donde

$l_t$	longitud de transmisión (in)
$l_s$	longitud de enfundado (in)
$f_{si}$	tensión del pretensado inmediatamente antes de la transferencia (ksi)
$d_b$	diámetro del cordón de pretensado (in)

## Discusión

Tanto la geometría de las vigas (sección transversal, separación entre cordones, tipo de cordón de pretensado, distancias de enfundado de los cordones), como el procedimiento de fabricación son similares a los empleados en la fabricación de vigas comerciales en el parque de prefabricación.

Resulta sumamente interesante la obtención de la longitud de transmisión de los cordones enfundados, la cual difiere de la establecida por la ACI como valor de diseño: la ACI establece que la longitud de transmisión de cordones enfundados es el doble de la correspondiente a cordones adherentes en toda su longitud. Quizás esto tenga en cuenta el caso más desfavorable en que se solapen las longitudes de transmisión de ambos tipos de cordón, es decir, cuando la distancia de enfundado sea inferior a la longitud de transmisión de los cordones totalmente adherentes.

Los cordones de pretensado superiores de las vigas han sido tesados a muy poca carga (un 11 y un 16% de la tensión de los cordones inferiores para 0.5 y 0.6" respectivamente). Esto explica que no se completara la investigación con resultados de longitud de transmisión de cordones superior.

#### **2.4.2.5. Abendroth, Stuart y Yuan (1997)**

La utilización de placas pretensadas como encofrado perdido del tablero en puentes es una práctica habitual. Se ha observado en ocasiones la formación de fisuras longitudinales paralelas a los cordones de pretensado, en la cara inferior de las prelosas. Estas fisuras permiten el acceso de sales disueltas a las armaduras activas, lo que podría desencadenar un proceso de corrosión de las mismas.

Los autores (ABEN97) desarrollaron un estudio con objeto de determinar la viabilidad de fabricar prelosas pretensadas con cordones de pretensado revestidos con un mortero de epoxi, conteniendo además malla de alambre recubierto de resina epoxi. El recubrimiento epoxi se planteaba con un doble objetivo:

- Aumentar la resistencia de las armaduras ante un eventual ataque por corrosión.
- Mejorar las propiedades adherentes de las armaduras activas, lo que conllevaría menores longitudes de transmisión de la fuerza de pretensado.

Para ello se realizó un estudio comparativo de placas pretensadas con cordones de pretensados revestidos de mortero epoxi, y armadas con mallas de alambres revestidos de resina epoxi, y placas pretensadas con armadura activa y pasiva sin revestir.

Como parte de este proyecto se estudió el espesor mínimo que podrían tener estas placas, armadas con cordones de 3/8 de pulgada de diámetro, y acero de 1860 MPa de tensión máxima y de baja relajación. Los cordones revestidos tenían recubiertos sus seis alambres exteriores.

Las placas que se fabricaron tenían una longitud de aproximadamente 2 metros, ancho variable entre 152 y 914 mm, canto total entre 64 y 102 mm, con pretensado variable entre 1 y 6 cordones. La fabricación de las mismas tuvo lugar en una bancada de pretensado metálica, que permitía la fabricación de cuatro placas simultáneamente. Los cordones se tesaron al 75% de su resistencia máxima, excepto en una de las puestas, en la que se tesaron al 83% de la fuerza máxima, para comprobar que el espesor recomendado de placa era adecuado para prevenir fisuración por hendimiento del hormigón.

##### **2.4.2.5.1. Instrumentación**

Las fuerzas en los cordones de pretensado se comprobaron con galgas extensométricas adheridas a las barras de 15.9 mm de diámetro, de acero de alta resistencia, acopladas a los cordones de pretensado, de 5 microdeformaciones de precisión. También se



utilizaron durante el tesado células de carga para medir la fuerza de pretensado en los cordones.

Se midió la temperatura en la bancada de pretensado y en el cordón de pretensado durante la fabricación de varias placas.

#### **2.4.2.5.2. Resultados analíticos y experimentales**

Durante el proceso de fabricación de las probetas se instrumentaron los cordones de pretensado. La tensión de los tendones entre el momento del tesado y la fabricación de las probetas sufrió pequeñas variaciones debidas a las fluctuaciones de temperatura y a la relajación del acero. También se registró un aumento de temperatura en los cables debido al calor de hidratación durante las primeras horas de fraguado del hormigón.

La máxima temperatura alcanzada por el hormigón durante los ensayos fue de 46 °C, y de 32 °C en el momento de la transferencia. La temperatura es un factor crítico para los cordones revestidos de mortero epoxi, pues se ha constatado experimentalmente que 38 °C es el umbral a partir del cual, si aumenta la temperatura, se produce una pérdida de adherencia del epoxi, con la consiguiente merma de las propiedades adherentes.

Por lo que respecta al espesor mínimo de placa, los autores recomiendan un valor de 76 mm para paneles pretensados con cordones de 3/8 de pulgadas de diámetro, y un hormigón con una resistencia a la edad de transferencia de 27.6 MPa como mínimo. Este valor se adoptó, tras comprobar que no existía fisuración superficial apreciable, incluso para una tensión de tesado inicial del 83% de la tensión máxima de los cordones.

Las longitudes de transmisión se determinaron midiendo las deformaciones superficiales inmediatamente después de la transferencia y transcurridas 18 horas de la misma. Se comprobó que los valores de longitud de transmisión para cordones de pretensado revestidos eran considerablemente inferiores a las obtenidas con cordones sin revestir.

#### **2.4.2.5.3. Conclusiones de los autores**

De entre las conclusiones destacan:

- Se recomiendan espesores mínimos de placa de 76 mm para cordones revestidos, y de 64 mm para cordones sin revestir.
- Las longitudes de transmisión previstas para cordones recubiertos de mortero epoxi fueron superiores a las obtenidas experimentalmente; un 77% superiores aplicando la fórmula de la ACI, y un 7% y un 36% aplicando la expresión deducida por Cousins et al. (COUS90a) y la correspondiente a las directrices de la PCI respectivamente.
- Las longitudes de transmisión previstas para cordones no revestidos fueron un 15% inferiores aplicando la fórmula de la ACI que las obtenidas experimentalmente. Sin embargo, aplicando las expresiones deducidas por Cousins et al. (COUS90a), Zia y Moustafa (ZIA77) y Mitchell et al. (MITC93), las previsiones proporcionadas por estos autores fueron un 16% superiores en el primer caso, y un 30% y un 40% inferiores respectivamente en el resto.

- En la mayor parte de los casos, las longitudes de transmisión medidas en cordones recubiertos fueron de aproximadamente la mitad que las longitudes de transmisión medidas para cordones sin recubrimiento.

#### **2.4.2.5.4. Discusión**

Este trabajo plantea la aplicabilidad de las fórmulas de determinación de las longitudes de transmisión y de anclaje para elementos de pequeño espesor, como las placas pretensadas.

Por otra parte supone un intento serio de comparar las propiedades adherentes de los cordones de pretensado recubiertos con mortero epoxi, y los cordones de pretensado sin revestimiento alguno.

Hay que destacar el peligro que supone el cambio de comportamiento de las resinas epoxi con la temperatura, dado el empeoramiento de sus propiedades adherentes en el entorno de los 40 °C, temperaturas habituales durante el proceso de fraguado y endurecimiento debido al calor de hidratación, y durante el servicio de las estructuras en determinados climas o situaciones.

El estudio de los recubrimientos, espesores mínimos y distancias mínimas entre cordones para estas prelosas presenta un gran interés, por la posibilidad de aplicación inmediata.

Para este tipo de elementos sería muy interesante conseguir una disminución del peso propio, mediante el uso de hormigones ligeros, lo que facilitaría el transporte y la puesta en obra.

#### **2.4.2.6. Russell y Burns (1997)**

El objetivo de esta investigación (RUSS97) es el estudio de la transferencia de pretensado por parte del cordón de 15.2 mm de diámetro, y evaluar la formulación de la normativa al respecto.

Los elementos fabricados eran prismas de pretensado centrado, de 102×127 mm de sección transversal, sin armadura de confinamiento alguna. La longitud de estos prismas fue de 3.66 m. En parte de los prismas se enfundó el cordón de pretensado a lo largo de los 203 mm extremos. En el resto, la longitud adherente del cordón se extendía a lo largo de toda la longitud.

El acero de pretensado es Grade 270, de baja relajación, con módulo elástico de 194 GPa. El autor analiza los valores de longitud de transmisión de prismas pretensados con cordones de 12.7 mm y de 15.2 mm de diámetro.

El autor defiende la determinación de la longitud de transmisión mediante el método del 95% de la deformación del tramo medio, como un método más objetivo que los otros métodos habituales.

El autor postula que la longitud de transmisión es sensiblemente lineal con el diámetro. La longitud de transferencia media medida es de 80 $\phi$ , en vez de los 50 $\phi$  recomendados habitualmente. Finalmente defiende que finalice la restricción de uso de los cordones de 15.2 mm de diámetro.



El artículo aquí resumido recibió una réplica de un prefabricador británico, que postulaba que en Gran Bretaña y en el resto de Europa la forma de transferencia habitual era la transferencia gradual mediante destesado de todos los cordones a la vez (generalización aventurada), en un proceso de 1 a 2 minutos de duración. El prefabricador sugería que la práctica de la transferencia súbita provoca longitudes de transmisión más elevadas, y el riesgo de piezas no conformes, con el consiguiente sobre coste, por lo que sugería que se reconsiderase la forma de transferencia súbita.

## Discusión

No se hace referencia a la corrección en la penetración del pretensado: esta corrección es necesaria, máxime cuando parte del cordón está enfundado en los extremos: si no aplicamos la corrección estaremos tomando como deslizamiento relativo lo que es acortamiento de la zona de cordón no adherente.

### 2.4.3. INVESTIGACIÓN SOBRE LA LONGITUD DE ANCLAJE EN VIGAS

#### 2.4.3.1. Chew Chong Key (Tesis Doctoral, 1991)

##### 2.4.3.1.1. *Objetivos de la investigación (CHON91)*

- Identificar los factores que afectan la adherencia dentro de la longitud de anclaje.
- Contribuir a la resolución de la controversia suscitada acerca de la adecuación de la ecuación vigente en el momento de la normativa ACI y diversas ecuaciones propuestas para predecir la longitud de anclaje de cordones de pretensado de siete alambres.
- Plantear una ecuación de predicción a la industria de la prefabricación que proporcione la suficiente seguridad.

##### 2.4.3.1.2. *Variables investigadas*

- Diámetro de cordón de pretensado: ½", ½" especial, 9/16", 0.6".
- Estado superficial del cordón de pretensado: brillante, parcialmente oxidado, recubierto de epoxi.
- Resistencia del hormigón.
- Distancia libre entre cordones: 1.75 y 2 pulgadas.
- Fabricante de los cordones de pretensado.

##### 2.4.3.1.3. *Descripción de las vigas ensayadas*

Se fabricaron y ensayaron hasta rotura un total de 22 vigas pretensadas, de 31 pies de longitud (9.5 metros de longitud) a una tensión inicial de pretensado del 75% de la carga unitaria máxima,  $f_{pu}$ . Dependiendo del diámetro de los cordones de pretensado, y, por lo tanto de su capacidad mecánica, se dispusieron en las vigas 9, 8 o 6 cordones de pretensado inferiores y 2 o 1 superiores.

Se fabricaron las vigas de dos en dos en una bancada de 37.6 m de longitud. En cada serie se fabricaban además dos prismas de hormigón con un cordón central sin tensión previa, de 45.7 y 91.4 cm de longitud. Se fabricaron además seis prismas pretensados, en una única puesta, con un solo cordón centrado, con las secciones transversales definidas en la Tabla 2.4.3.1.3-1:

Tabla 2.4.3.1.3-1

Diámetro cordón (")	$\frac{\sigma_{p_0}}{f_{pu}}$ (ksi)	Sección transversal (mm <sup>2</sup> )
0.6	0.75	114×114

El tesado se realizó con un gato de pretensado controlado electrónicamente. El control de tesado se realizó por alargamiento. Tras el tesado se colocó la armadura de confinamiento y de cortante, y se procedió al hormigonado de las vigas con cubilote de 0.75 m<sup>3</sup>. Se fabricaron además 8 probetas por viga para controlar la resistencia del hormigón durante la transferencia y el ensayo estático de las vigas. El curado del hormigón se aceleraba cubriendo las vigas con láminas de polietileno, y aplicando vapor durante 8 a 14 horas.

La transferencia de pretensado se realizaba cuando la resistencia de las vigas alcanzaba los 28 MPa, exceptuando dos casos, en los que las resistencias fueron de 23 y 26 MPa respectivamente. La forma de transferir la fuerza de pretensado era mediante soplete, cortando simultáneamente cada cordón de pretensado a ambos lados de la viga a la vez.

El recubrimiento epoxi utilizado consistía en resina epoxi con impregnación de óxido de aluminio para conferirle un aspecto rugoso que mejorase la adherencia. El óxido de aluminio reemplazó al cristal machacado utilizado en los ensayos de Cousins y Johnston (COUS90b), para evitar una posible reacción alcali-ácido.

#### 2.4.3.1.4. Instrumentación empleada. Métodos de ensayo

Tras tesar los cordones de pretensado a unos 20 kN cada uno en la bancada de pretensado, se procedía a la colocación de galgas extensométricas, paralelas al eje de los alambres exteriores que conforman el tendón, con objeto de detectar los cambios de deformación de los tendones de pretensado. Estas galgas se impermeabilizaban después, y la distancia a la que se pegaban era la longitud estimada de anclaje.

El autor señala que aproximadamente la mitad de las galgas colocadas fallaron durante la realización de los ensayos. El alto número de galgas perdidas hizo plantearse al autor la fiabilidad de las galgas restantes.

La penetración del cable de pretensado durante la transferencia se midió individualmente a ambos lados de la viga, fijando una cinta adhesiva sobre el cable a aproximadamente 25 mm del paramento de la viga, y trazando sobre la misma una fina marca. Después se medía la penetración mediante un calibre Starret de 0.002 mm de precisión. El valor de la penetración del cordón de pretensado se calculaba posteriormente descontando el acortamiento elástico entre la marca y la superficie de hormigón.

También se realizaron ensayos de arrancamiento ("pull-out" test) sobre los prismas fabricados.

#### 2.4.3.1.5. Ensayos de determinación de la longitud de anclaje estática

Para proceder al ensayo de las vigas a flexión, se apoyaban éstas en la zona extrema a lo largo de 15 cm, en tubos de acero rellenos de hormigón. La carga aplicada era una única carga puntual, aplicada mediante una central hidráulica. El control de la carga aplicada



se realizaba mediante una célula de carga acoplada al actuador. La flecha de la viga en el punto de aplicación de la carga se determinó mediante LVDT's.

Durante el ensayo de la viga, se colocaron relojes micrométricos en cada extremo del cordón de pretensado, para medir la penetración durante el ensayo.

La forma de estimar la longitud de anclaje se realizó por tanteos. La carga se aplicaba a una distancia del extremo de la viga igual a la longitud de anclaje total estimada. En el caso de que el agotamiento de la viga se alcanzase con deslizamiento de alguno de los cordones, en el siguiente ensayo se aumentaba la distancia del extremo a la carga aplicada. En caso contrario, cuando la rotura de la viga se alcanzaba sin que se hubiese detectado ningún deslizamiento de ningún cordón de pretensado, se disminuía la distancia desde el extremo al punto de aplicación de la carga ("embedment length").

#### 2.4.3.1.6. Longitudes de transmisión

Se realizaron medidas de las deformaciones del hormigón en ambos extremos de cada viga, a la altura del centro de gravedad de los cordones inferiores de pretensado y a la altura del centro de gravedad de la sección.

El autor justifica las variaciones de las deformaciones del hormigón de la zona central de la viga respecto a un valor constante, por la falta de homogeneidad del hormigón y la limitada precisión de las medidas. No alude al hecho de que al ser el pretensado excéntrico aparecen deformaciones debidas al peso propio de la viga, que empieza a actuar en el momento de la transferencia.

El autor adopta la hipótesis de que la distribución de deformaciones del hormigón a lo largo de la viga es bilineal. Señala que de esta forma, debido a la longitud base del instrumento de medida la zona del quiebro se transforma en una curva de transición, por lo que aparentemente "aumenta" la longitud de transmisión.

El método que plantea el autor de la tesis consiste en determinar el punto de corte de ambas ramas lineales, obviando la parte curva de la distribución de deformaciones. No contempla el efecto debido al peso propio de la viga.

Las longitudes de transferencia obtenidas por el autor para el diámetro de cordón que nos interesa, 0.6", son las reflejadas en la Tabla 2.4.3.1.6-1.

Tabla 2.4.3.1.6-1

VIGA	$f_{ct}$ (MPa)	Lt (mm)	Deslizamiento medio inferior (mm)	Deslizamiento medio superior (mm)
6-1-ext	28	635	1.91	6.58
6-1-int	28	686	2.16	6.68
6-2-ext	29	762	2.03	9.07
6-2-int	29	610	1.83	9.35
6-3-ext	36	584	1.73	4.01
6-3-int	36	533	1.47	3.28
6-4-ext	38	559	1.19	3.73
6-4-int	38	584	1.65	4.57

#### **2.4.3.1.7. Ensayos de determinación de la longitud de anclaje estática**

El autor determina antes de los ensayos la tensión en el cable de pretensado a partir de las galgas pegadas en el cable. No menciona si tiene en cuenta la relajación del cable de pretensado, o la desprecia.

Se diferencian los siguientes tipos de rotura:

1. Rotura por flexión, caracterizada por un comportamiento lineal del diagrama carga aplicada-flecha, hasta el instante de la fisuración. En ese momento disminuye la rigidez de la viga paulatinamente hasta el instante de la rotura, sin que ningún cordón de pretensado haya deslizado previamente (F).
2. Rotura por fallo de adherencia, caracterizada por un tramo lineal del diagrama carga-flecha, seguido de comportamiento no lineal hasta que se produce el deslizamiento de los cordones de pretensado seguido de fallo por flexión (B-F) o cortante (B-S).
3. Rotura por flexión/adherencia, cuando se produce el fenómeno indicado en el punto anterior, cerca del momento máximo o tras el comienzo del agotamiento del hormigón a compresión (B-F).

En todos los ensayos se registró la carga correspondiente a un deslizamiento de 0.0025 mm.

#### **2.4.3.1.8. Variables que influyen en el desarrollo de la adherencia**

Entre los fenómenos señalados por el autor como determinantes de la forma de actuar la adherencia cabe señalar los siguientes:

- El efecto de los apoyos extremos de la zona de transmisión, produce unas tensiones normales al cordón de pretensado, y un efecto de confinamiento del hormigón. De esta forma se dificulta la aparición de fisuras en la interfase.
- Efecto de las armaduras de confinamiento, que aumentan ligeramente la rigidez del hormigón antes de que se produzca la fisuración, momento en que realmente empieza a trabajar este tipo de armaduras.
- Estado superficial de los cordones de pretensado. Cordones sometidos a la intemperie durante un día producen una disminución de la longitud de transmisión de hasta un 28%. Tres días de exposición reducen la misma hasta en un 40% en algunos casos, siendo la media de un 22%.
- Como resultado parcial de estos ensayos el autor destaca la mejor adherencia relativa de los cordones de 0.6" respecto a los de menor diámetro, hecho que atribuye a la mejor adherencia mecánica, por la mayor superficie en contacto entre el cordón de pretensado y el hormigón que lo rodea.

#### **2.4.3.1.9. Discusión**

- La investigación consiste en la determinación de las propiedades de la longitud de anclaje en vigas a escala real, con gran número de cordones pretensados inferiores, de 6 a 9, manejando gran número de variables: resistencia del hormigón, diámetro de los cables de pretensado, estado superficial, recubrimiento epoxi, separación entre cordones.



- El tratamiento de los datos es escaso, limitándose a regresión de tipo lineal, incluso en casos donde el factor de correlación indica poca adecuación o ninguna.
- Cabe destacar la ingeniosa manera de medir la penetración del cordón de pretensado en la superficie de hormigón, considerablemente más barata que mediante el empleo de los transductores de desplazamiento.
- No especifica contraflechas de las vigas tras transferencia, ni antes de los ensayos estáticos de determinación de la longitud de anclaje.
- El autor obvia el efecto de la excentricidad del pretensado en las deformaciones longitudinales del hormigón. Las contraflechas que se originan por este efecto introducen deformaciones adicionales en el hormigón. Atribuye la forma curva de las deformaciones longitudinales de las vigas a la falta de homogeneidad del hormigón y la limitada precisión de las medidas.
- Se plantea un nuevo método de determinación de la longitud de transmisión, “slope-intercept method”, válido especialmente para prismas de transmisión, que actualmente se considera como uno de los tres métodos más utilizados por diversos autores, como hemos visto.
- Se calcula automáticamente la tensión en los cordones de pretensado a partir de las deformaciones del cable, sin tener en cuenta la relajación, que por definición implica una pérdida de tensión a deformación constante.

#### 2.4.3.2. Mitchell, Cook, Khan y Tham (1993)

Durante esta campaña de ensayos (MITC93) se fabricaron 22 vigas pretensadas, que se ensayaron posteriormente con objeto de determinar la influencia de la resistencia del hormigón en la longitud de transmisión de los cordones de pretensado.

Las variables estudiadas fueron la resistencia del hormigón (los hormigones ensayados presentaban resistencias entre 21 y 50 MPa a la edad de la transferencia), y el diámetro de los cordones (se estudiaron cordones de 9.5, 12.7 y 15.7 mm de diámetro).

##### 2.4.3.2.1. Programa experimental

Las dosificaciones de hormigón ensayadas fueron las reflejadas en la Tabla 2.4.3.2.1-1.

Tabla 2.4.3.2.1-1

Componentes	Amasadas 1 y 2		Amasadas 3 y 4		Amasada 5	
	Tipo	Cantidad (kg/m <sup>3</sup> )	Tipo	Cantidad (gr)	Tipo	Cantidad (gr)
Cemento	Type 30	410				
Cemento + humo de sílice <sup>2.4</sup>	Type 30		—	506		500
Arena	—	750	—	793		690
Árido grueso	5-20 mm	1020	5-10 mm	1015	10-14 mm	1180
Agua	—	170	—	126		118
Reductor de agua	—	1.285	—	1.305		1.500
Superplastificante				7.5		10.61
Aireante	—	0.260	—			
A/C	—	0.41	—	0.26		0.26

<sup>2.4</sup> Mezcla de cemento y microsílíce, conteniendo un 7% de humo de sílice.

Las vigas realizadas con las amasadas 1 y 2 se curaron al vapor durante 18 horas. El resto de las vigas, fabricadas con las amasadas 3, 4 y 5, se curaron con humedad durante 20 horas, puesto que no fue necesario acelerar el fraguado para conseguir las resistencias necesarias a las 24 horas.

Los cordones de 9.5 mm de diámetro eran de acero libre de tensiones residuales, de 1813 MPa de resistencia máxima, y su superficie estaba ligeramente oxidada. Los cordones de pretensado de 12.7 mm y 15.7 mm de diámetro nominal presentaron respectivamente tensiones de rotura de 1903 y 1793 MPa, presentaban ambos una superficie limpia y lisa.

La transferencia de pretensado tuvo lugar a las 24 horas, excepto para las vigas confeccionadas con la amasada 2, en las que la transferencia tuvo lugar a las 48 horas.

La sección de las vigas ensayadas era rectangular, de 100×200 mm. Cada viga iba armada con un único cordón de pretensado, de 9.5, 12.7 o 15.7 mm. La longitud de las vigas era de 3556 o de 2540 mm. En todos los casos el centro del cordón de pretensado estaba situado a 50 mm de la cara inferior de la viga.

La instrumentación de la viga se llevó a cabo mediante:

- Galgas extensométricas pegadas a lo largo del cordón de pretensado.
- Bases de medida para extensómetro tipo Demec, pegadas a lo largo de las caras laterales de la viga, para medir la variación de las deformaciones superficiales a lo largo de la viga.

Las medidas de la deformación de la viga se tomaron justo antes de transferir, inmediatamente después de la transferencia y antes del ensayo para determinar la longitud de anclaje. También se efectuaron medidas durante la realización del ensayo, para determinar las curvaturas.

El ensayo de determinación de la longitud de anclaje se llevó a cabo aplicando una carga centrada o bien dos cargas puntuales, aplicadas simétricamente respecto a los extremos.

Durante estos ensayos las vigas se apoyaron sobre placas de neopreno, y se dispusieron LVDT's debajo de los puntos de aplicación de la carga, y en las caras frontal y dorsal de la viga, con objeto de medir la penetración de los extremos del cable.

En cada escalón de carga se midieron los anchos de fisura a la altura del cordón de pretensado.

#### **2.4.3.2.2. Resultados de los ensayos de determinación de las longitudes de transmisión**

Para interpretar los resultados de estos ensayos se utilizó el método de ajuste de pendientes ("slope intercept method"), anteriormente descrito.

La deformación experimentada por la viga en sus extremos es debida a la retracción que se produce desde el momento de la transferencia hasta el instante de la medida. Fuera de la zona de apoyos, la deformación experimentada se debe al efecto combinado de retracción, fluencia y relajación del pretensado.



Con el aumento de la resistencia del hormigón se constató la mejora de las propiedades de adherencia del hormigón. Además, el mayor módulo de deformación y la menor relación agua-cemento conducen a menores deformaciones por fluencia y retracción después de la transferencia. Las pérdidas de pretensado debidas al acortamiento elástico, y las pérdidas diferidas serán menores para los hormigones más resistentes.

A partir de los resultados experimentales se dedujeron unas expresiones para la determinación de la longitud de transmisión:

$$l_t = 0.048 \cdot f_{pi} \cdot d_b \cdot \sqrt{\frac{20}{f'_{ci}}}$$

$l_t$  = longitud de transmisión (mm)

$d_b$  = diámetro nominal del cordón de pretensado (mm)

$f_{pi}$  = tensión en el pretensado inmediatamente después de la transferencia (MPa)

$f'_{ci}$  = resistencia del hormigón en el momento de la transferencia de pretensado (MPa)

Hay que tener en cuenta que esta expresión se ha deducido teniendo en cuenta transferencia gradual.

#### 2.4.3.2.3. Resultados de los ensayos de determinación de las longitudes de anclaje

Se denomina longitud embebida del cordón,  $l_e$ , ("embedment length") a la distancia existente entre el extremo más cercano de la viga y el punto de carga de la misma.

Los elementos pretensados se ensayaron a los 20 y 25 días del hormigonado mediante una carga puntual centrada o dos cargas simétricas.

Las roturas que se producían después de haberse producido un deslizamiento apreciable del cordón de pretensado, seguido de una rotura prematura por fallo de cortante o de flexión, eran las catalogadas como roturas por adherencia.

A partir de los resultados experimentales se dedujeron unas expresiones para la determinación de la longitud de anclaje:

$$l_d = 0.048 \cdot f_{pi} \cdot d_b \cdot \sqrt{\frac{20}{f'_{ci}}} + 0.145(f_{ps} - f_{se})d_b \sqrt{\frac{30}{f'_c}}$$

$l_d$  = longitud de transmisión (mm)

$d_b$  = diámetro nominal del cordón de pretensado (mm)

$f_{pi}$  = tensión en el pretensado inmediatamente después de la transferencia (MPa)

$f'_{ci}$  = resistencia del hormigón en el momento de la transferencia de pretensado (MPa)

$f_{ps}$  = tensión en el cordón de pretensado, durante la acción de las cargas exteriores (ksi)

$f_{se}$  = tensión efectiva de pretensado (MPa)

$f'_c$  = resistencia del hormigón a compresión en servicio (MPa)

#### 2.4.3.2.4. Recomendaciones de diseño

Es necesario conocer la longitud de transmisión en dos etapas del proceso de diseño:

- Comprobación de tensiones en la zona cercana al extremo de la viga, para lo cual es más desfavorable una longitud de transmisión más corta.
- Comprobación de la capacidad resistente de la viga frente a esfuerzo cortante y momento flector, para lo cual son más desfavorables longitudes de transmisión y de anclaje más elevadas.

Para efectuar la primera comprobación los autores proponen una fórmula para la longitud de transmisión más conservadora:

$$l_t = 50d_b \sqrt{\frac{20}{f'_{ci}}}$$

$l_t$  = longitud de transmisión (mm)

$d_b$  = diámetro nominal del cordón de pretensado (mm)

$f'_{ci}$  = resistencia del hormigón en el momento de la transferencia de pretensado (MPa)

que proporciona valores menores que la ecuación propuesta anteriormente. Esta expresión no debe ser usada para calcular la porción de longitud de transmisión dentro de la longitud de anclaje.

#### 2.4.3.2.5. Conclusiones de los autores

De entre las conclusiones de los autores, destacamos las siguientes:

- Cuanto mayor es la resistencia del hormigón en el momento de la transferencia, menor es la longitud de transmisión.
- Se ha deducido una expresión para la determinación de la longitud de transmisión, por la cual el valor de esta longitud depende del diámetro nominal de cordón utilizado, de la tensión del acero considerando las pérdidas instantáneas, y de la resistencia a compresión del hormigón en el momento de la transferencia. Esta expresión es válida para transferencia gradual.
- Se propone una expresión, conservadora a juicio de los autores, de la longitud de transmisión para efectuar la comprobación de tensiones en las zonas extremas de la pieza.
- Cuanto mayor es la resistencia del hormigón a la edad de comprobación, menor es la longitud total de anclaje. Se ha deducido una expresión para la determinación de la longitud de anclaje, por la cual el valor de esta longitud depende del diámetro nominal del cordón de pretensado,  $d_b$ , de la tensión en el cordón de pretensado durante la acción de las cargas exteriores,  $f_{ps}$ , de la tensión efectiva de pretensado considerando que se han producido todas las pérdidas de pretensado,  $f_{se}$ , y de la resistencia del hormigón en servicio,  $f'_c$ . Esta expresión es válida para transferencia gradual.



#### **2.4.3.2.6. Discusión**

En este trabajo se comprueba la influencia de la resistencia del hormigón sobre las propiedades adherentes del hormigón pretensado.

Los hormigones utilizados para los ensayos presentan una gran similitud con nuestro hormigón convencional, en cuanto a dosificación y resistencias alcanzadas a la edad de transferencia, entre 24 y 48 horas, y a la edad de 28 días. No se hace referencia a las trabajabilidades alcanzadas para estos hormigones.

Además de estudiar la influencia de la resistencia del hormigón, se analizó el efecto de distintos diámetros de cable, entre 9.5 y 15.7 mm.

Los resultados experimentales se comparan con las previsiones de longitud de transmisión y de anclaje proporcionadas por las formulaciones de las normativas, de lo que deducen la necesidad de plantear nuevas expresiones para los hormigones utilizados en la actualidad. Por su parte, plantean modificaciones de las expresiones existentes basadas en sus resultados experimentales.

En este artículo se hace hincapié en la importancia de una correcta predicción de las longitudes de adherencia y anclaje, con objeto de realizar una doble comprobación:

- Comprobación de que las tensiones de compresión que produce el propio pretensado en la zona de transmisión (Estado Límite de Servicio de Fisuración). Para esta comprobación es desfavorable un valor reducido de la longitud de transmisión.
- Comprobación de la capacidad resistente de la pieza frente a esfuerzo cortante y momento flector, para la cual son más desfavorables valores elevados de longitud de transmisión y de anclaje (Estado Límite Último).

#### **2.4.3.3. Cousins, Stallings y Simmons (1995)**

Los autores (COUS95) exponen los resultados de una investigación, cuya variable es la separación mínima entre cordones: 50 mm para cordones de 12.7 mm de diámetro, según lo establecido por la ACI, y 44.5 mm, siguiendo la práctica de algunos estados.

La sección transversal adoptada es tipo T, con 9 cordones de pretensado, diseñada para presentar rotura dúctil.

Se fabricaron vigas con dos tipos de hormigón: una dosificación que proporcionaba resistencias medias (38 MPa a la edad de transferencia) y otra de alta resistencia (55 MPa a la edad de transferencia).

La tensión inicial de tesado se fijó en el 80% de la tensión unitaria máxima, de modo que tras la transferencia no se superase el 75% de la resistencia de la carga unitaria máxima del pretensado.

El curado se realizó en el laboratorio, cubriendo las vigas con láminas de polietileno, y manteniendo la superficie superior húmeda hasta la transferencia.

La transferencia se realizó con soplete de oxiacetileno, de cordón en cordón, desde los cordones superiores a los inferiores. Se instrumentaron los anclajes activo y pasivo con células de carga. No se detectó fisuración en ninguna viga durante la transferencia.

Se determinó la longitud de transmisión mediante el método del 100% de la deformación.

Posteriormente se ensayaron las vigas hasta rotura, buscando la longitud de anclaje. Se detectaron tres tipos de rotura:

- Rotura por flexión.
- Modo combinado de rotura flexión-adherencia: cuando la rotura se produce después de haberse detectado deslizamiento, pero para un momento superior al nominal.
- Rotura por adherencia: se detecta deslizamiento de todos los cordones, y la capacidad resistente es considerablemente menor que la nominal. Aparece fisuración de flexión cerca de la zona de transmisión.

Se obtuvieron valores de la longitud de transmisión para cordones de 0.5" entre 1041 mm y 1727 mm para el hormigón de resistencia normal; y entre 660 mm y 1245 mm para el de alta resistencia.

### Conclusiones

- Los autores concluyen que la longitud de anclaje no se ve afectada por la menor separación entre cordones.
- No se detectó fisuración de hendimiento tras la transferencia, debidas a una menor separación entre cordones.
- Los autores observaron una considerable reducción de longitudes de transmisión y de anclaje al utilizar un hormigón de alta resistencia.

### Discusión

- No se especifica si se ha conservado alguna viga, para su observación durante el tiempo. De esta forma, si se produjese fisuración tras la edad de ensayo, no se habría detectado. La conclusión de que separaciones menores entre cordones no provoca fisuración por hendimiento es un poco aventurada.
- Hay que destacar la última conclusión, los autores aprecian un descenso de los valores de longitud de transmisión y de anclaje al utilizar hormigón de alta resistencia.

#### 2.4.3.4. Deatherage, Burdette y Chew (1994)

Este artículo (DEAT94) resume la investigación llevada a cabo, en la Universidad de Tennessee (véase también CHON91), coordinada por la FHWA, en la que se estudió la influencia del tamaño de cordón de pretensado, la separación media entre cordones de pretensado para cordones de 0.5".

Se fabricaron vigas AASHTO tipo 1, de 9.45 metros de longitud, pretensadas con 6 a 9 cordones de pretensado inferiores, y uno o dos superiores, dependiendo del tamaño del cordón de pretensado. El pretensado se tesó al 75% de la carga unitaria máxima. Se fabricaron también prismas pretensados con un solo cordón, y se realizaron ensayos "pull-out" sobre cordón sin tensión. La transferencia se realizó con soplete.

Las conclusiones de esta investigación son:



- Los autores proponen la misma expresión que Shahawy e Isa para la evaluación de la longitud de transmisión de cordones adherentes.
- Se recomienda la aceptación de uso de los cordones de 0.6".
- Se establece que la separación de 44.5 mm entre centros de cordones es suficiente para los cordones de 0.5".
- Se propone la siguiente ecuación para la evaluación de la longitud de anclaje:

$$l_d = \frac{f_{si}}{3} d_b + 1.5(f_{ps} - f_{se}) d_b$$

que proporciona resultados de la longitud de anclaje un 35% superiores a los estimados por la expresión de la ACI.

#### 2.4.3.5. FHWA (1994)

Este informe (FHWA94) es el resultado de analizar los resultados de las investigaciones realizadas en varias universidades de Estados Unidos y Canadá, coordinados por la FHWA, a cargo de Susan Lane.

En este informe se aborda un estudio de los factores que afectan a la longitud de transmisión y de anclaje en general. También se analizan las causas de incertidumbre de la medida de la longitud de transmisión a partir de las medidas de deformación de la superficie.

Finalmente se propone una expresión para la determinación de la longitud de anclaje:

$$L_d = \frac{f_{si} d_b}{3} + \lambda (f_{ps} - f_{se}) d_b$$

$$1 \leq \lambda = 0.6 + 40\epsilon_{ps} \leq 2$$

en la cual, el primer término corresponde a la longitud de transmisión y el segundo a la longitud complementaria a tracción.

$L_d$  = longitud de anclaje

$f_{si}$  = fuerza de pretensado inmediatamente antes de la transferencia

$d_b$  = diámetro del cordón de pretensado

$f_{ps}$  = tensión del pretensado correspondiente a la capacidad nominal a flexión

$f_{se}$  = pretensado efectivo, en el instante de evaluación

$\epsilon_{ps}$  = deformación del pretensado correspondiente a la capacidad nominal a flexión

En el caso de cordones de pretensado superiores, por debajo de los cuales el espesor de hormigón fresco sea de al menos 305 mm, la longitud proporcionada por esta expresión deberá multiplicarse por 1.3.

#### 2.4.3.6. Mahmoud, Rizcalla y Zaghloul (1999)

En la presente investigación (MAHM99), los autores presentan los resultados de ensayos realizados para determinar las propiedades adherentes de dos tipos de pretensado no metálico, comparativamente a las que presenta el acero. Todos los tendones empleados se enfundaron a lo largo de los 50 o 100 mm finales, y se dispuso armadura de confinamiento consistente en estribos de 6 mm cada 80 mm. El recubrimiento adoptado es de cuatro diámetros.

Los autores plantean un ensayo, como ensayo estandarizado de determinación de la longitud de anclaje, que describimos a continuación:

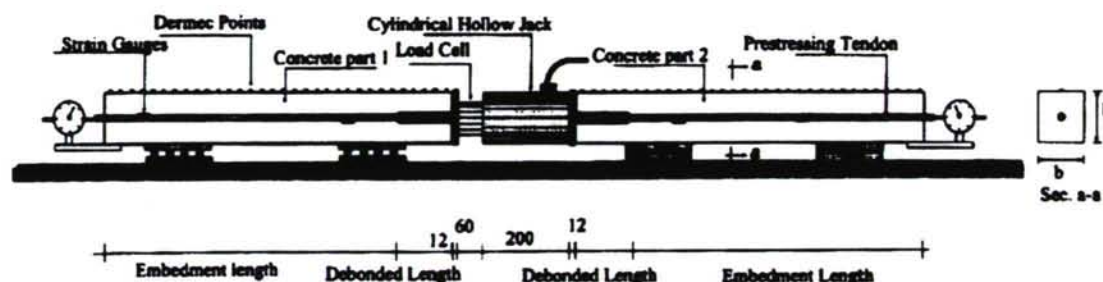


Figura 2.4.3.6-1: Esquema del ensayo de prisma planteado (MAHM99)

Cada prisma consta realmente de dos partes, entre las cuales se dispone un gato hueco y una célula de carga hueca, antes de la fabricación. El gato y la célula de carga se apoyan en ambos semiprismas mediante láminas de teflón (véase la Figura 2.4.3.6-1).

Tras la transferencia, la fuerza de pretensado se transfiere a ambas partes del prisma. La fuerza de pretensado en la zona central se mide a través de la célula de carga hueca. La segunda parte del ensayo consiste en separar ambas partes, accionando el gato hueco (ensayo de anclaje). En los extremos del conjunto se mide el deslizamiento. Según los autores, las posibles formas de rotura son tres: rotura por deslizamiento generalizado, rotura por plastificación del pretensado, o rotura por hendimiento del hormigón si el pretensado no es suficiente.

Los autores concluyen que:

- El recubrimiento neto de cuatro diámetros es suficiente para prevenir fisuración por hendimiento durante la transferencia.
- El ensayo planteado es fácil, barato y simple de realizar.

## Discusión

- Este ensayo, propuesto por los autores como ensayo normativo, teóricamente constituye una forma de determinar realmente la longitud de transmisión, y la fuerza de pretensado tras la transferencia y las pérdidas de pretensado de manera directa.
- El ensayo teóricamente constituye una forma de determinar realmente la longitud de anclaje a tracción, de forma mucho más económica que ensayando vigas, y hasta la rotura del elemento, bien por adherencia o por rotura del cordón de pretensado. Para ello es necesario una bancada de laboratorio, un sistema de instrumentación adecuado, célula de carga sensible, y, sobre todo, un sistema hidráulico muy estable.
- Las objeciones que se pueden plantear son que, realmente, la holgura entre el conjunto gato+célula de carga hueca y las dos mitades del prisma ha de ser inexistente antes de la transferencia. Si esto no sucede, realmente se transfiere pretensado desde ambos extremos de cada semiprisma. La forma de evitarlo es ajustar antes de la transferencia la carrera del gato para que la célula de carga indique una ligera presión. El sistema gato+célula de carga ha de mantenerse en adelante indeformable, porque si se acorta, estará induciendo pérdidas de pretensado al conjunto parásitas, y si se alarga, tracciones en los prismas.



- Además, el hormigonado del prisma se realiza con el cordón de pretensado horizontal, lo que coincide con la mayoría de las aplicaciones.

#### **2.4.3.7. Lu, Boothby, Bakis y Nanni (2000)**

Este artículo (LU00) se centra en la investigación de las propiedades adherentes de tendones no metálicos: en este caso, tres tipos de tendones no metálicos, y como material de referencia, cordones pretensados de acero de 5/16" de diámetro nominal.

Se fabricaron prismas de pretensado concéntricos de 89×89 mm de 2.4 metros de longitud, y vigas pretensadas con un único cordón, de sección rectangular de 89×178 mm, de 2.4 a 3 metros de longitud con un solo cordón de pretensado. Las vigas se ensayaron hasta rotura con una carga concentrada aplicada a la longitud estimada de anclaje.

Los autores obtienen valores de longitud de transmisión y anclaje para los diferentes tendones de pretensado.

#### **2.4.4. OTRAS INVESTIGACIONES**

En este apartado se resumen las investigaciones realizadas sobre temas varios, como pueden ser casos de patología de vigas pretensadas, métodos de reparación de las mismas, realización de ensayos para la evaluación del daño, y evaluación de la efectividad de los métodos de reparación.

También se resumen una investigación reciente con la finalidad de sistematizar la transferencia de pretensado, así como las discusiones suscitadas por las diferentes formas de transferencia.

##### **2.4.4.1. Green, Cookson y Johnson (1984)**

En el presente artículo (GREE84), los autores presentan los resultados de ensayar hasta rotura vigas prefabricadas pretensadas de sección doble T, que presentaron problemas durante el proceso de fabricación. Este problema se suele presentar durante las etapas de clima frío, cuando un excesivo curado al vapor se hace necesario.

El problema consistió en la aparición de fisuras transversales que atravesaban toda la sección de hormigón, de mayor abertura en la parte superior de las vigas. Estas fisuras se produjeron debido a efectos térmicos durante el proceso de curado al vapor, que produjeron variaciones de tensión en los cables, que condujeron a tracciones excesivas en el hormigón.

La temperatura durante el proceso de fabricación estuvo comprendida entre 0 °C y 7 °C. La investigación se centró en dilucidar si cuando se presenta este problema hay que rechazar estos elementos. Para ello se realizaron ensayos no destructivos con objeto de:

- Determinar la carga necesaria para reabrir estas fisuras, que desaparecieron durante la transferencia.
- Calcular la capacidad resistente a flexión de estos elementos.
- Evaluar la capacidad resistente a cortante de estas vigas.

- Comparar el comportamiento global de estas vigas dañadas respecto a las vigas sin daños.
- Valorar los efectos de estas fisuras en la durabilidad.

Las fisuras aparecidas presentaron hasta 1 mm de abertura en la parte superior de la viga, siendo muy finas en la parte inferior, traspasando la mayor parte toda la sección. Tras la transferencia, la abertura de fisura se redujo a menos de 0.1 mm. Las fisuras estaban situadas principalmente en los extremos de las vigas, en algunos casos incluso en la zona central.

Las vigas fueron ensayadas a flexión, en ensayo no destructivo, a fin de evaluar la capacidad resistente remanente.

También se efectuaron ensayos de permeabilidad en las fisuras (ensayo U-test) a fin de analizar el riesgo de corrosión. Se comprobó que la permeabilidad en zonas fisuradas y zonas sin fisurar eran similares en las vigas dañadas y sin dañar, excepto en la parte superior de la sección, donde la compresión era menor y la abertura de fisuras máxima, por lo que los autores dedujeron que tuvo lugar un proceso de auto-regeneración de las fisuras.

Según los autores, las condiciones para que se produzca la auto-regeneración de fisuras son:

- Las fisuras han de haberse producido a temprana edad.
- El hormigón fisurado está sometido tras la formación de fisuras a una compresión considerable.
- El proceso de auto-regeneración tiene lugar en un ambiente húmedo.

Los autores plantean el seguimiento del siguiente procedimiento, en caso de aparición de fisuras antes de la transferencia:

- Identificación de la causa de las fisuras, retracción o efectos de la temperatura. Las segundas están relacionadas con temperaturas bajas, cuando se produce curado al vapor.
- Marcado de las fisuras.
- Transferencia lo antes posible. La abertura de fisuras ha de haberse reducido a menos de 0.1 mm.
- Ensayo la viga no antes de los 28 días, hasta la carga correspondiente a la aparición de tensiones admisibles de tracción. Descarga de la viga. No deberán apreciarse las fisuras, para lo cual se habrán instrumentado con puntos de extensometría. La curva P-delta ha de ser sensiblemente recta y la recuperación de deformación superior al 90%.
- Cuando las fisuras se hayan producido en la zona de cortante crítico, comprobar lo mismo que el punto anterior, y además, cerca del final de la viga, en la zona de transmisión, comprobar que ésta no varía apreciablemente.
- Donde se hayan producido fisuras a flexión, en caso de que las tensiones de compresión tras la transferencia sean bajas, tratar con agente impermeabilizante.

Si se cumplen estas condiciones, los autores establecen que las vigas se pueden emplear para su incorporación en obras de forma definitiva.



## Discusión

- En este caso el ensayo de las vigas se realizó en la fábrica, mediante un pórtico construido al efecto. No se especifica la forma de colocación de las vigas, ni el tipo de anclaje del pórtico de ensayos.
- Resulta paradójico por qué no se planteó colocar un encofrado y reparar las fisuras (en la zona superior alcanzan los 10 mm de abertura) antes de la transferencia, inyectando resina epoxi, por ejemplo. Aún así, habría que ensayar las vigas, para comprobar que la adherencia no hubiese sido dañada en las cercanías de las fisuras.
- No se especifica la velocidad de ensayo, ni la precisión en la medida de la carga.
- No se especifica la instrumentación adoptada para la medición de flechas, ni su precisión.
- Las conclusiones son realmente explícitas, positivas y de aplicación inmediata. Las reflexiones y comprobación de la auto-regeneración de las fisuras bajo cargas de compresión son muy interesantes.
- Los autores no tienen en consideración la longitud de anclaje, a la que pueden afectar las fisuras preexistentes, ni comprobación alguna de que esta resulte dañada.
- Al no haber instrumentado previamente los cordones de pretensado, debido a que las vigas procedían de la fabricación propia de la planta, no se puede saber la variación de tensión del pretensado inferior durante el ensayo.

### 2.4.4.2. Kannel, French y Stolarski (1997)

Los autores (KANN97) plantean una metodología de transferencia de pretensado realizada con soplete, para minimizar la fisuración por hendimiento ocurrida durante la transferencia. La fisuración a que hacen referencia sucede en los extremos de las vigas, se trata de fisuras discretas y de pequeña longitud, horizontales, verticales o inclinadas, en la unión ala-alma o en la parte inferior de vigas de sección doble T.

En el artículo, los autores describen la investigación llevada a cabo, consistente en un modelo de elementos finitos tridimensional, y la observación del proceso de transferencia en una fábrica. El pretensado considerado consiste en cordones rectos adherentes, cordones parcialmente enfundados poligonales. El modelo que plantean, de elementos finitos, trata al hormigón como un material lineal y elástico debido a que, según los autores, se trata de evitar la fisuración. Se tiene en cuenta en el modelo el rozamiento entre las vigas y la solera. No se especifica el tratamiento que dan a la adherencia entre hormigón y pretensado en la zona extrema de las vigas.

Los autores se basan en la investigación previa de Mirza y Tawfik, en la que se modela la serie de vigas de la bancada con un modelo unidimensional elástico, en el que se modelan los tramos viga-longitud de cordón libre con elementos tipo muelle. En este modelo, según Kannel et al., no se tiene en cuenta el rozamiento solera-viga, ni los efectos tridimensionales en los extremos de las vigas inducidos por el orden de corte de los cordones.

En el artículo, los autores plantean tres configuraciones de transferencia de pretensado: la empleada en fábrica habitualmente, y dos opciones destinadas a reducir la fisuración. Se fabricaron vigas, transfiriendo el pretensado acorde con las configuraciones planteadas. Se instrumentaron los extremos de las vigas con puntos de extensometría, y con bandas extensométricas adheridas a los cordones de pretensado.



Mirza y Tawfik concluyeron en su investigación que es conveniente el corte previo de la zona de cable libre de longitud máxima, para minimizar las tensiones de tracción en los extremos de las vigas, originadas por los cordones restantes. Los autores recomiendan dejar una longitud de cable libre entre vigas, de al menos un 5% de la longitud de bancada.

Como conclusiones, los autores:

- Recomiendan disponer una longitud de cable libre de al menos el 10 o el 15% de la longitud total de bancada, en vez del 5% recomendado por Mirza y Tawfik.
- Señalan la importancia del orden de transferencia de los cordones sobre la tendencia a la fisuración. Recomiendan cortar desde el interior de la viga hacia el exterior de la misma, para prevenir la fisuración.
- Recomiendan una aumentar la pendiente de la zona de unión ala-alma, para evita fisuración por efecto rasante en esta zona.
- Aconsejan cortar cordones rectos adherentes, antes de cortar los cordones enfundados: se recomienda pre-cortar un par de cordones rectos, por cada tres pares de cordones enfundados.

El artículo suscitó una discusión en la citada revista, encabezada por la réplica del Profesor Gamble<sup>2.5</sup>, aduciendo que los autores no especifican la forma de transferencia entre vigas, las dimensiones de la sección transversal de las vigas, la posición y longitud de enfundado parcial de los cordones enfundados, el tipo de cordón de pretensado, la tensión inicial del pretensado, la anchura de fisuras media.

#### **2.4.4.3. Zobel y Jirsa (1998)**

Los autores (ZOB98) exponen los resultados de la investigación llevada a cabo para reparar una viga pretensada con cordones de 12.7 mm, que forma parte de un paso de ferrocarril, dañada lateralmente por el choque de un vehículo. La zona dañada afectaba a cuatro cordones laterales, de un total de 28. La viga dañada se retiró del paso y se llevó al laboratorio, para efectuar la reparación y los ensayos correspondientes.

Los cordones de pretensado de la zona dañada no presentaban daño alguno. Antes de reparar la viga, se ensayó la misma para determinar la rigidez inicial. Tras adherir bandas extensométricas en los cordones dañados, se cortaron a fin de colocar posteriormente los sistemas de empalme. La deformación experimentada al cortar se midió para evaluar el estado tensional de los cordones antes del corte. Tras el corte de dos cordones se ensayó la viga para determinar la pérdida de rigidez, operación que se repitió tras cortar los dos cordones dañados restantes. La carga remanente en los cordones representaba menos de la mitad de la carga inicial de pretensado. La carga de retesado es de 111 kN, un 80% de la carga inicial de tesado.

Se dispusieron sucesivamente cuatro dispositivos de reparación diferentes, consistentes en sistemas de empalme y posterior recuperación de tensión. Se ensayó la viga con cada uno de ellos estáticamente a carga simétrica, situada a 3.14 metros de ambos extremos, hasta su carga nominal de diseño.

<sup>2.5</sup> PCI Journal, enero-febrero, 1997.



Tras el ensayo se seleccionó el método de reparación que proporcionó mejor resultado, en cuanto a rigidez/ausencia de deslizamiento, y a facilidad de colocación y retesado; tras lo cual se reparó la zona de hormigón de recubrimiento dañada. Finalmente se repuso la viga en la estructura de la que procedía.

Entre las conclusiones de los autores cabe destacar el resultado positivo de las preparaciones por ensamblaje y retesado de los cordones. Los autores señalan el peligro de fallo por fatiga en el caso de empalmes con sistema de cuñas. Los autores postulan que los sistemas empleados de reparación proporcionan una resistencia al cordón reparado del 85% de la resistencia nominal.

Los autores recomiendan el empleo de este tipo de reparación cuando el daño no se haya producido cerca de la zona de anclaje, y cuando el número de cordones dañados no supere el 10-15% del total.

### Discusión

- El ensayo efectuado es un ensayo estático: la capacidad resistente remanente del hormigón de la zona de anclaje, o de los sistemas de empalme frente a esfuerzos repetidos no se especifica. Sin embargo, las solicitaciones de un paso de ferrocarril son en gran parte dinámicas.
- En las recomendaciones no se hace referencia a la longitud de anclaje. No se tiene en cuenta la alteración que tiene lugar en la zona de anclaje al producirse el retesado de los cordones. Las pérdidas de pretensado de los cordones, de un 50%, son demasiado elevadas para no implicar fallo de la zona de anclaje.
- Habría sido conveniente realizar un ensayo de tipo dinámico, para evaluar la capacidad resistente y la ausencia de degradación de la zona de anclaje de la viga: interacción pretensado-hormigón.
- No se especifica el programa de vigilancia/instrumentación posterior a la reparación.

### 2.4.5. MÉTODOS NUMÉRICOS

A continuación se resumen varias investigaciones sobre los métodos analíticos y numéricos, relacionadas con la adherencia del pretensado de armadura pretesa.

#### 2.4.5.1. Fujii y Takeshi (1972)

Los autores (FUJII72) consideran la clasificación habitual de las tensiones de adherencia: adherencia por contacto, rozamiento y adherencia mecánica.

Los autores plantean una ley {tensión de adherencia del pretensado-distancia a extremo más próximo} con dos máximos (véase la Figura 2.4.5.1-2), en contraposición a la ley habitualmente aceptada en hormigón armado (véase la Figura 2.4.5.1-1). La primera parte de la curva, desde el extremo del elemento hasta el segundo máximo corresponde a la zona donde se produce deslizamiento relativo (se ha perdido la adherencia por contacto). La segunda zona corresponde a la zona de adherencia perfecta, pese a lo cual no se anulan las tensiones de adherencia (coexisten los tres tipos de adherencia).

Siendo

$\tau_{cp}$  tensión de adherencia entre el hormigón y el pretensado  
 $z$  distancia desde extremo del elemento

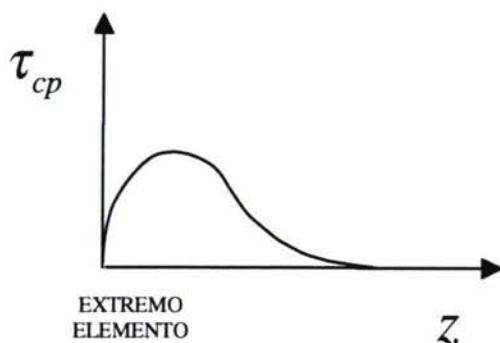


Figura 2.4.5.1-1: (FUJI72)

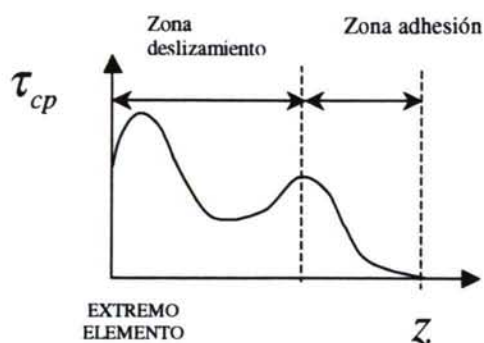


Figura 2.4.5.1-2: (FUJI72)

Hay que matizar que el concepto de adherencia perfecta se refiere generalmente a la ausencia de deslizamientos relativos. Esto no implica que no puedan existir tensiones de adherencia. En zonas de adherencia perfecta pueden producirse tensiones tangenciales, mientras no superen el umbral de la tensión de adherencia crítica, a partir de la cual se produce el deslizamiento (el razonamiento es análogo al concepto coeficiente de rozamiento estático/dinámico).

Por lo tanto, según postulan los autores, en la zona de adhesión existen tensiones de adherencia, en ausencia de deslizamiento relativo.

Asumiendo simetría axial alrededor del cordón de pretensado, en un sistema cilíndrico de coordenadas  $(r, \theta, z)$ , la ecuación de equilibrio que relaciona la tensión normal (según  $z$ ) y la tensión tangencial (paralela a  $z$ ) es:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial z} + \frac{\partial \tau}{\partial r} + \frac{\tau}{r} = 0$$

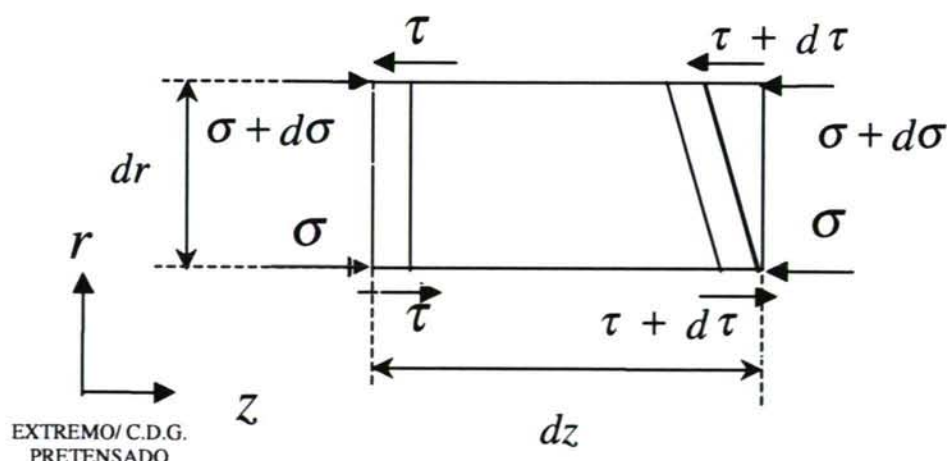


Figura 2.4.5.1-3



Planteando equilibrio en el siguiente elemento diferencial (Figura 2.4.5.1-3) se obtiene:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial r} = 2(1+\nu) \frac{\partial \tau}{\partial z}$$

Mediante las ecuaciones obtenidas, conocidas las isobaras de  $\tau$  en el plano  $z-r$ , se podrían dibujar las líneas de igual tensión de  $\sigma$ . La primera familia de isobaras se puede construir a partir de la ley tensión de adherencia hormigón-pretensado respecto a la distancia al extremo.

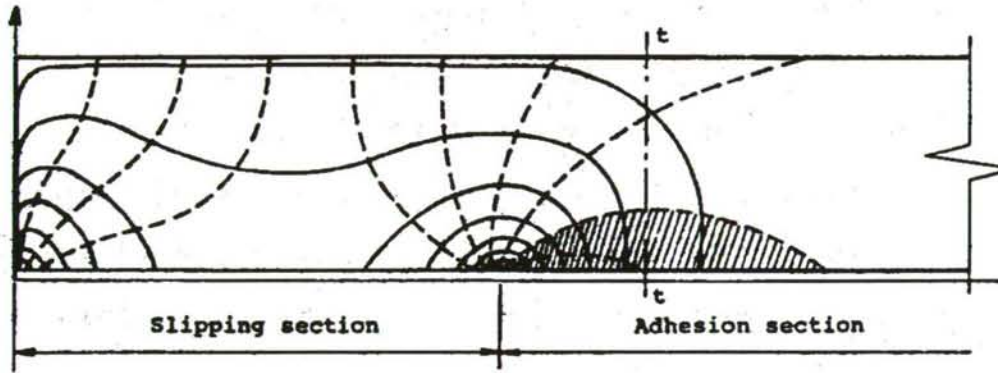


Figura 2.4.5.1-4: (FUJI72)

Adoptando la ley planteada en la Figura 2.4.5.1-4, se obtiene una distribución de isobaras como la de la figura, en la que se aprecia que:

A pesar de que la distribución de isobaras es compleja en el contacto hormigón-pretensado, en el paramento se aprecia que las isobaras de  $\sigma$  están uniformemente distribuidas (evidentemente, por condiciones de contorno,  $\tau = 0$ ). Esto implica que las deformaciones instantáneas que midamos en la superficie de hormigón presentarán una ley aproximadamente lineal respecto a  $z$ .

Matemáticamente, los autores lo expresan así:

$$\tau(r \rightarrow R) = 0; \left. \frac{\partial \tau}{\partial r} \right|_{r \rightarrow R} = -k \Rightarrow \left. \frac{\partial \sigma}{\partial z} \right|_{r \rightarrow R} + \left. \frac{\partial \tau}{\partial r} \right|_{r \rightarrow R} = -k$$

siendo  $k$  una constante, por lo que:

$$\left. \frac{\partial \sigma}{\partial z} \right|_{r \rightarrow R} = k$$

o lo que es lo mismo, la tensión normal es lineal respecto a la distancia al extremo de la viga.

Al cambiar de sección circular a sección cuadrada o rectangular, se aprecia que se produce un máximo en la curva de la tensión normal respecto a la distancia al extremo del elemento, antes de que se produzca la estabilización de la ley (véanse las Figuras 2.4.5.1-5 y 2.4.5.1-6).

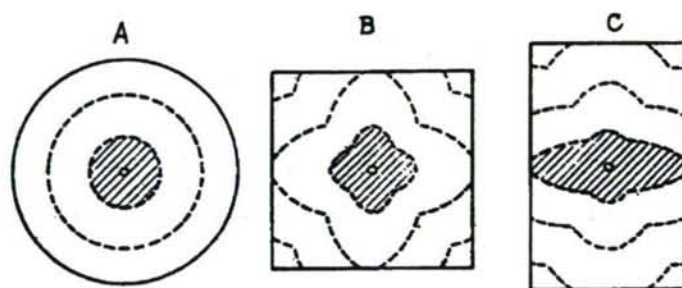


Figura 2.4.5.1-5: (FUJI72)

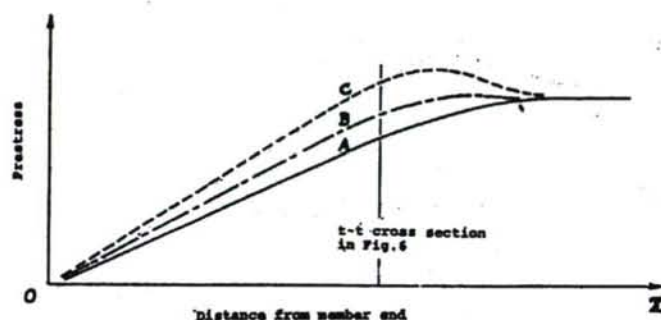


Figura 2.4.5.1-6: (FUJI72)

Los autores acompañaron esta deducción con ensayos en prismas pretensados de diferentes formas, instrumentados con galgas embebidas en el hormigón, y galgas adheridas a la superficie lateral de los prismas, a la altura del pretensado.

Los autores exponen las siguientes conclusiones:

- La curva adherencia-distancia a extremo presenta dos máximos.
- Dada una curva prefijada tensión de adherencia-distancia a extremo, se pueden visualizar las isobaras de  $\sigma$  y de  $\tau$ , para un elemento pretensado cilíndrico, con pretensado centrado.
- La distribución de deformaciones respecto a la distancia a extremo del elemento depende de la forma de la sección.

### Discusión

- Los autores han encontrado una ley de tensiones de adherencia respecto a  $x$ , más genérica que la habitual, y compatible con los resultados experimentales. De todas formas, esto no implica que la solución sea única.
- El método planteado es válido, útil y didáctico para expresar el efecto de Saint-Venant en elementos pretesos.
- Realmente esto podría constituir una explicación plausible de los resultados experimentales obtenidos por diversos autores.

### 2.4.5.2. Sarles e Itani (1984)

Los autores (SARL84) realizan la investigación numérica previa, destinada a evaluar la viabilidad de suprimir el macizado en los extremos de un tipo particular de vigas doble T. Esta investigación suponía un paso previo a una investigación experimental que confirmase las predicciones numéricas, en caso de que fuese viable la supresión del macizado.



Los autores presentan los resultados de una investigación numérica, destinada a:

- La obtención de la distribución de tensiones en la zona de transmisión de elementos pretensados de armadura pretesa, aplicando el método de elementos finitos.
- La evaluación de los efectos del macizado de la sección, en vigas pretensadas, en los extremos. Se considera macizado sin superficie o planos de transición y macizado con superficie de transición. Valores de tensión más elevados implican, según los autores, riesgo de fisuración por hendidamiento.
- La fuerza de pretensado se introduce en el modelo como carga en los nodos. La forma de considerar la fuerza de pretensado en el modelo, es asumir una longitud de transmisión, y establecer una ley lineal de la fuerza de pretensado hasta la transición, en que adopta el valor máximo, de la zona de adherencia perfecta.

Los autores plantean distintas variables:

- Armadura postesa y pretesa.
- Pretensado centrado en la sección/excéntrico.
- Longitud de transmisión baja/elevada (la elevada es el doble de la baja).

## Conclusiones

- En el caso de elementos pretensados de armadura pretesa centrada, los bloques ejercen un efecto positivo, reduciendo las tensiones transversales. Asimismo, la longitud de transmisión más elevada reduce considerablemente las tensiones transversales.
- En el caso de elementos pretensados de armadura pretesa excéntrica, las tensiones transversales se reducen con el macizado. Paradójicamente, Las tensiones máximas aumentan con la longitud de transmisión. Las tensiones aumentan con la excentricidad.
- En el caso particular de las vigas comerciales estudiadas, según los autores el macizado tiene la única finalidad de reducir la congestión de armadura transversal de confinamiento, al existir más espacio para su disposición.

## Discusión

- Generalmente, la disposición de macizado en los extremos de las vigas tienen como finalidad conferirles mayor resistencia a cortante. En las vigas comerciales de gran tamaño, el macizado es reducido, limitándose a un regruesamiento de la losa inferior (vigas artesa y cajón). Los autores no estudian los efectos de la supresión de la zona macizada en la resistencia a cortante.
- El modelo de hormigón, si bien es muy simple (material elástico, ausencia de fisuración, no redistribución de esfuerzos), sirve para predecir las zonas preferentes de fisuración, en caso de tensiones elevadas; y para evaluar el riesgo potencial de fisuración (mayor cuanto mayores sean las tensiones previstas). El pretensado se introduce como carga repartida longitudinal, y el abanico considerado para el valor de la longitud de transmisión es acertado.
- Los autores llegan a la conclusión de que cuanto mayor es la longitud de transmisión del pretensado excéntrico, mayores son las tensiones en la zona de anclaje. Esto resulta sorprendente, parecería que el valor de la longitud de

transmisión más elevado conduciría a una menor concentración de tensiones en la zona de anclaje.

### 2.4.5.3. Abrishami y Mitchell (1996)

#### 2.4.5.3.1. Planteamiento del modelo

Durante muchos años se buscó un ensayo de adherencia uniforme, para estudiar las propiedades adherentes de la armadura pasiva mediante ensayos tipo “pull-out” o “beam-test”. La discusión se centraba en la longitud adherente entre el hormigón y la armadura, que proporcionase una distribución de tensiones a lo largo de la zona adherente lo más uniforme posible.

El objetivo de esta investigación (ABRI96) es deducir la distribución de tensiones de adherencia que se producen a lo largo de la probeta de hormigón armado ensayadas mediante ensayos “pull-out”, “push-in” o una combinación de ambos; y evaluar la uniformidad de esa distribución.

En cada uno de los ensayos se miden las cargas aplicadas en el cable en la parte superior e inferior del mismo (respectivamente  $P_t$  y  $P_b$ ), mediante células de carga. Simultáneamente se determina el deslizamiento relativo entre cordón y probeta, en la cara superior e inferior de la misma, mediante transductores de desplazamiento, lo que permite determinar el deslizamiento medio  $\delta_{av}$ . Así, para cada escalón de carga, conocemos la relación “tensión media de adherencia ( $u$ )-deslizamiento medio ( $\delta_{av}$ )”.

Esta relación depende del tipo de ensayo que se haya efectuado, y del tipo de rotura que se haya obtenido:

- Rotura por “pull-out” o arrancamiento de la armadura.
- Rotura por hendimiento del hormigón que rodea la armadura.

Seguidamente, en las Figuras 2.4.5.3.1-1 y 2.4.5.3.1-2, se exponen las leyes de tensión media de adherencia respecto a los desplazamientos obtenidos a lo largo de la realización de los ensayos de Abrishami-Mitchell (ABRI93).

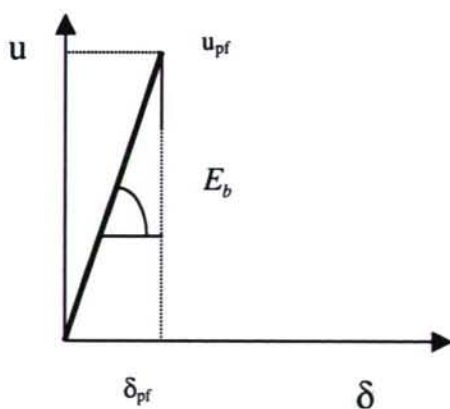


Figura 2.4.5.3.1-1

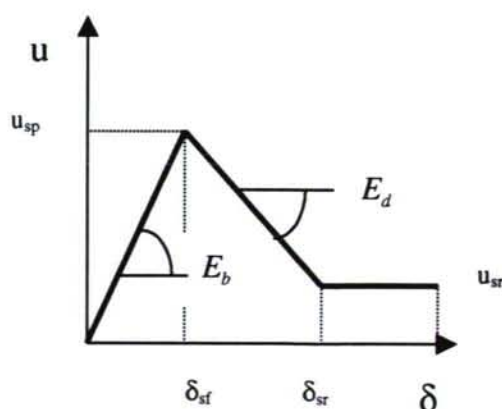


Figura 2.4.5.3.1-2

donde:



$u$  tensión de adherencia  
 $\delta$  penetración del pretensado

Estas leyes experimentales son las que se adoptan como relación  $u(x) = f(\delta(x))$ , que relacionan la tensión media de adherencia en un punto a altura  $x$  de la probeta, con el deslizamiento relativo  $\delta(x)$  que se produce en ese punto.

Por lo tanto, ya se tienen los elementos suficientes para resolver la ecuación diferencial, lo que se hará siguiendo el proceso reflejado en la Tabla 2.4.5.3.1-1:

Tabla 2.4.5.3.1-1

RESULTADOS DEL ENSAYO $u = f(\delta)$	
<p>FALLO POR PULL-OUT</p> $u = E_b \delta, 0 \leq \delta \leq \delta_{pf}$ $u = 0, \delta \geq \delta_{pf}$ $E_b = \frac{u_{pf}}{\delta_{pf}}$	<p>FALLO POR HENDIMIENTO DEL HORMIGÓN</p> $u = E_b \delta, 0 < \delta < \delta_{sf}$ $u = E_d \delta + E_b \delta_{sf} - E_d \delta_{sf}, \delta_{sf} < \delta < \delta_{sr}$ $u = u_{sr}, \delta > \delta_{sr}$
<p>ECUACIÓN DIFERENCIAL</p> $\frac{d^2 \delta(x)}{dx^2} - k_s u = 0, k_s = \frac{4(1+n\rho)}{d_b E_s}$	
CONDICIONES DE CONTORNO	
<p><math>x = 0</math></p> $\epsilon_c = 0$ $\epsilon_s = -\frac{P_t}{E_s A_s}$	<p><math>x = l</math></p> $\epsilon_c = -\frac{(P_b + P_t)}{E_c A_c}$ $\epsilon_s = \frac{P_b}{E_s A_s}$

Abrishami y Mitchell distinguen tres tipos de ensayos de adherencia, según aparece en la Tabla 2.4.5.3.1-2:

Tabla 2.4.5.3.1-2

Ensayo "pull-out" standard	Ensayo "push-in"	Ensayo combinado "pull-out/push-in"
$P_t = 0$	$P_t < 0$	$P_t = \phi P$
$P_b > 0$	$P_b = 0$	$P_t = (1 - \phi P), \phi \in (0,1)$

Resolviendo la ecuación diferencial para cada caso, resulta:

### FALLO DE ADHERENCIA POR "PULL-OUT"

$$k = \sqrt{k_s E_b}$$

$$\delta(x) = c_1 e^{kx} + c_2 e^{-kx}, \quad 0 \leq \delta \leq \delta_{pf}$$

$$u(x) = E_b (c_1 e^{kx} + c_2 e^{-kx}), \quad 0 \leq \delta \leq \delta_{pf}$$

$$c_1 = \frac{1}{k} \left[ (e^{kl} - e^{-kl})^{-1} \left( \frac{\phi e^{-kl}}{E_s A_s} + \frac{1-\phi}{E_s A_s} + \frac{1}{E_c A_c} \right) P \right]$$

$$c_2 = \frac{1}{k} \left[ (e^{kl} - e^{-kl})^{-1} \left( \frac{\phi e^{-kl}}{E_s A_s} + \frac{1-\phi}{E_s A_s} + \frac{1}{E_c A_c} \right) + \frac{\phi}{E_s A_s} \right] P$$

$$P = \left[ \frac{2k(e^{kl} - e^{-kl}) \left( \frac{E_s A_s}{1+n\rho} \right) \right] \delta_{av}$$

$$P = P_t + P_b$$

### FALLO DE LA ADHERENCIA POR HENDIMIENTO

$$0 \leq \delta \leq \delta_{sf}$$

$$k = \sqrt{k_s E_b}$$

$$\delta(x) = c_1 e^{kx} + c_2 e^{-kx},$$

$$u(x) = E_b (c_1 e^{kx} + c_2 e^{-kx})$$

$$c_1 = \frac{1}{k} \left[ (e^{kl} - e^{-kl})^{-1} \left( \frac{\phi e^{-kl}}{E_s A_s} + \frac{1-\phi}{E_s A_s} + \frac{1}{E_c A_c} \right) P \right]$$

$$c_2 = \frac{1}{k} \left[ (e^{kl} - e^{-kl})^{-1} \left( \frac{\phi e^{-kl}}{E_s A_s} + \frac{1-\phi}{E_s A_s} + \frac{1}{E_c A_c} \right) + \frac{\phi}{E_s A_s} \right] P$$

$$P = \left[ \frac{2k(e^{kl} - e^{-kl}) \left( \frac{E_s A_s}{1+n\rho} \right) \right] \delta_{av}$$

$$\delta_{sf} \leq \delta \leq \delta_{sr}$$

$$j = \sqrt{-k_s E_d}$$

$$\delta(x) = c_3 \cos(jx) + c_4 \sin(jx) - m$$

$$m = \delta_{sf} \left( \frac{E_b}{E_d} - 1 \right)$$

$$u(x) = E_d (c_3 \cos(jx) + c_4 \sin(jx))$$

$$c_3 = \frac{-1}{j \sin(jx)} \left[ \left( \frac{\phi \cos(jl)}{E_s A_s} + \frac{1-\phi}{E_s A_s} + \frac{1}{E_c A_c} \right) P \right]$$

$$c_4 = \frac{-\phi}{k E_s A_s} P$$

$$P = \left[ \frac{-2j \cdot \sin(jl) \left( \frac{E_s A_s}{1+n\rho} \right) \right] (\delta_{av} + m)$$

Los autores determinan la distribución de tensiones en las probetas de hormigón armado  $\phi 15 \times 30$  cm ensayadas previamente (ABRI92), con objeto de compararla con una distribución uniforme.

Para ello se determinan los parámetros de la Tabla 2.4.5.3.1-3:



Tabla 2.4.5.3.1-3

Tipo de ensayo	$d_b$ (mm)	Tipo de fallo	$\frac{u_{max}}{u_{min}}$	$\frac{u_{max}}{u_{av}}$
Resultados del ensayo "pull-out" standard	25.2	"Pull-out"	1.67	1.37
Resultados correspondientes a fallo por hendimiento, rama ascendente/rama descendente	25.2	Hendimiento	1.39/1.11	1.26/1.04
Resultados de ensayo combinado "pull-out/push-in" ( $P/P_b = 0.6$ )	35.7	"Pull-out"	1.16	1.10
Resultados de ensayo combinado "pull-out/push-in" ( $P/P_b = 0.6$ )	35.7	Hendimiento	1.16	1.10

$U_{m\acute{a}x}$  = tensi3n de adherencia máxima en la probeta

$U_{m\acute{i}n}$  = tensi3n de adherencia mínima en la probeta

$U_{av}$  = tensi3n de adherencia media en la probeta

Se utiliz3 el modelo para comparar la distribuci3n de tensiones de adherencia y las tensiones medias alcanzadas al variar la longitud de las probetas,  $l$ , constatándose que menores longitudes proporcionan distribuciones más uniformes, hecho que había sido constatado experimentalmente, si bien los valores de tensi3n media de adherencia que proporcionan son excesivos. Una longitud de probeta de 300 mm parece un valor razonable, en opini3n de los autores.

#### 2.4.5.3.2. Conclusiones de los autores

De entre las conclusiones expuestas en el trabajo, destacamos:

- Se han deducido unas expresiones que permiten conocer la distribuci3n de las tensiones de adherencia dentro de la probeta, en el momento de la rotura, según esta sea de tipo fallo por hendimiento o por "pull-out". Las tensiones dependen de la longitud de adherencia, diámetro de las armaduras, propiedades del hormig3n y del tamaño de la probeta.
- Se estudiaron los resultados de ensayos de "pull-out" standard, roturas por hendimiento y ensayos combinados "pull-out/push-in".
- El ensayo resultante de la combinaci3n de "pull-out" y "push-in" es el que presenta una distribuci3n de tensiones más uniforme dentro de la zona adherente de la probeta.

#### 2.4.5.3.3. Discusi3n

- El modelo planteado permite predecir la carga de rotura de probetas ensayadas a adherencia, pero para ello es necesario conocer la pendiente de la curva de comportamiento  $u_{av}-\delta_{av}$  para el hormig3n ensayado, deducida de ensayos anteriores.
- El modelo de comportamiento tenso-deformacional del hormig3n es un modelo elástico, por lo que habría que verificar que las tensiones en el hormig3n durante el ensayo sean efectivamente moderadas.

- La relación tensión de adherencia-deslizamiento que se adopta es la relación tensión media de adherencia-deslizamiento medio, es decir, la media del deslizamiento de la parte cara superior de la probeta y de la cara inferior de la probeta. Habría que cuestionarse la analogía de este comportamiento con la distribución  $u(x)-\delta(x)$  en un punto a la altura "x", situado en el interior de la probeta.
- No se tiene en cuenta el efecto Poisson.
- Aunque los mismos autores realizaron ensayos de adherencia con cordones de pretensado, no se hace mención a la posibilidad de aplicar el modelo desarrollado a los resultados obtenidos.

#### 2.4.6. FACTORES ANALIZADOS EN LA BIBLIOGRAFÍA QUE AFECTAN A LA ADHERENCIA

En la Tabla 2.4.6-1 se resumen los factores que se han considerado a lo largo de las investigaciones previas, y sus efectos sobre las zonas de transmisión y complementaria a tracción:

$l_{bpt}$	=	longitud de transmisión
$l_{bpd}$	=	longitud de anclaje
$l_{bpc}$	=	longitud complementaria a tracción
↓		aumento de la longitud correspondiente
↑		disminución de la longitud correspondiente
?		efecto dudoso

A estos factores hay que añadir:

1. Tipo de comprobación: servicio (dimensionamiento de armadura pasiva, anclajes) o capacidad resistente.
2. Tipo de hormigón: tipo de árido grueso, tipo y cantidad de los componentes.
3. Orden de transferencia de los cordones de pretensado dentro de la sección.
4. Tipo de pretensado: centrado/excéntrico; en el caso de pretensado centrado, no aparecen tras la transferencia esfuerzos de cortante y flexión inducidos por el propio pretensado. En el caso de pretensado excéntrico, al transferir se producirán contraflechas, por lo que al peso propio introducirá esfuerzos que generarán campos de tensiones, que se superpondrán a los generados por el pretensado.
5. Tipo de lubricante empleado durante el proceso de trefilado (ROSE97).
6. La relación agua-cemento del hormigón. Cuando menor es ésta, mejor es la adherencia (TILA77).
7. La cercanía de las zonas de apoyo/aplicación de carga, que introducen tensiones transversales de confinamiento (WEER91, DENU91).
8. El paso de hélice de los alambres exteriores del cordón (DENU91) y la coacción/libertad del giro del cordón de pretensado a lo largo de su "huella" (TILA77, COUS86, DENU91).



Tabla 2.4.6-1

Factor	Tendencia	Efecto en longitud de transmisión	Efecto en longitud complementaria a tracción
1. Diámetro del cordón de pretensado	↑	↑ $l_{bpt}$	↑ $l_{bpc}$
2. Tensión inicial de tesado	↑	↑ $l_{bpt}$	↓ $l_{bpc}$ , ↓ $\frac{l_{bpc}}{l_{bpt}}$
3. Tensión del pretensado a la edad de evaluación de la longitud de anclaje	↑	↑ $l_{bpt}$	↓ $l_{bpc}$ , ↓ $\frac{l_{bpc}}{l_{bpt}}$
4. Tensión del pretensado en rotura	↑		↑ $l_{bpc}$
5. Pérdidas de pretensado	↑	?	↑ $l_{bpc}$
6. Edad de transferencia	↑	↓ $l_{bpt}$	↓ $l_{bpc}$
7. Rugosidad superficial	↑	↓ $l_{bpt}$	↓ $l_{bpc}$
8. Verticalidad del cordón respecto a horizontal	↑	↓ $l_{bpt}$	↓ $l_{bpc}$
9. Espesor de hormigón fresco debajo del cordón considerado	↑	↑ $l_{bpt}$	↑ $l_{bpc}$
10. Recubrimiento	↑	↓ $l_{bpt}$	↓ $l_{bpc}$
11. Separación entre cordones	↑	↓ $l_{bpt}$	↓ $l_{bpc}$
12. Consistencia del hormigón durante la colocación (más, blanda)	↑	↑ $l_{bpt}$	↑ $l_{bpc}$
13. Compacidad del hormigón alrededor del cordón	↑	↓ $l_{bpt}$	↓ $l_{bpc}$
14. Presencia de armadura de confinamiento	↑	↓ $l_{bpt}$	↓ $l_{bpc}$
15. Resistencia del hormigón a compresión	↑	↓ $l_{bpt}$	↓ $l_{bpc}$
16. Resistencia a tracción	↑	↓ $l_{bpt}$	↓ $l_{bpc}$
17. Rigidez del hormigón	↑	↓ $l_{bpt}$ <sup>2.6</sup>	↓ $l_{bpc}$
18. Retracción	↑	↑ $l_{bpt}$	↑ $l_{bpc}$
19. Fluencia	↑	↑ $l_{bpt}$	↑ $l_{bpc}$
20. Efecto dinámico de las cargas aplicadas	↑	↑ $l_{bpt}$	↑ $l_{bpc}$
21. Enfundado parcial del cordón	↑	↑ $l_{bpt}$	?
22. Edad del hormigón a la edad de carga	↑		↓ $l_{bpc}$
23. Cercanía de la viga a la zona de corte	↑	↑ $l_{bpt}$	↑ $l_{bpt}$
24. Longitud de cable libre entre vigas en la bancada	↑	↓ $l_{bpt}$	↓ $l_{bpc}$
25. Recubrimiento con mortero epoxi	SÍ	↓ $l_{bpt}$	↓ $l_{bpc}$
26. Tratamientos térmicos: curado acelerado	SÍ	↑ $l_{bpt}$	↑ $l_{bpc}$
27. Tiempo transcurrido desde la transferencia	↑	↑ $l_{bpt}$	↑ $l_{bpc}$

<sup>2.6</sup> Cuanto mayor es el módulo de deformación del hormigón mayor es la fuerza de pretensado transferida, lo que parece influye en el sentido de aumentar la longitud de transmisión.

## 2.5. NORMATIVAS Y RECOMENDACIONES

### 2.5.1. PLANTEAMIENTO DE LAS DIVERSAS NORMATIVAS Y RECOMENDACIONES

#### 2.5.1.1. CEB-FIP CM 1990

El planteamiento del Código Modelo (CM90) se basa en las investigaciones llevadas a cabo en la Universidad de Delft (DENU91).

##### 2.5.1.1.1. Antecedentes

La formulación del código modelo se basa en la investigación experimental realizada mediante ensayos de pórtico en probeta (DENU91):

- La zona de transmisión se simuló mediante ensayos de pórtico sobre probeta, en los que previamente se había tesado la armadura.
- La zona complementaria a tracción se simuló mediante ensayos pull-out sobre armadura sin tensión.

Además, se tuvieron en cuenta los resultados de los ensayos previos realizados en vigas por otros investigadores.

En el código modelo se diferencian dos situaciones de adherencia:

- Push-in, relacionado con la zona de transmisión
- Pull-out, relacionado con la zona complementaria a tracción. Mediante el ensayo se determina una cota inferior de la tensión de adherencia.

El valor de la longitud de transmisión que se calcula es el inmediato tras la transferencia.

Den Uijl postula que existe una dispersión apreciable en los valores de la longitud de transmisión, que conduce a que exista una diferencia apreciable entre los valores máximos y mínimos. Señala la importancia de ambas cotas: la cota superior es crucial para determinar la capacidad adherente de las vigas a cortante y flexión, y la cota inferior condiciona el valor de las tensiones transversales que se originan en la zona de transmisión. A través de análisis estadístico, postula un valor de:

$$\frac{l_{bpt,0.95}}{l_{bpt,0.95}} \approx 1.9$$

Esta es la razón de que el código modelo adopte un valor de 2.

Por otra parte, en el código modelo se diferencia entre:

- Longitud de anclaje básica: la longitud necesaria para anclar la fuerza unitaria máxima del tendón.
- Longitud de anclaje de diseño: la longitud necesaria para anclar la tensión de cálculo del tendón de pretensado.



Den Uijl (DENU91) defiende la hipótesis de crecimiento lineal de la fuerza de pretensado en la zona de transmisión, basándose en el comportamiento no lineal del hormigón. Debido a éste, la tensión de adherencia en la zona de transmisión es bastante uniforme, lo que justifica el comportamiento lineal en la zona de transmisión, más adecuado que el crecimiento cuadrático propuesto por diversos autores (E21395).

El autor plantea un resumen de los resultados del estudio de la fisuración por hendimiento en elementos sin armadura transversal, variando el recubrimiento y la separación entre cordones. Los resultados se resumen en la Tabla 2.5.1.1.1-1, en la que se proporciona el número de elementos que presentaron fisuras (véase la Figura 2.5.1.1.1-1), respecto al total:

Tabla 2.5.1.1.1-1

	$\frac{c}{\phi}$	1.5	2.3	3.1	3.9
$\frac{s}{\phi}$		⇓	⇓	⇓	⇓
1.4	⇒	b=110	b=130	b=150	b=170
		—	h1/1	v3/4	v3/4
2.2	⇒	b=130	b=150	b=170	b=190
		h1/1	h1/3	h2/4	0/2
3.0	⇒	b=150	b=170	b=190	b=210
		h3/3	3/3	0/2	0/1

donde:

- s    separación neta entre cordones
- c    recubrimiento neto del pretensado
- ϕ    diámetro del cordón
- b    ancho de la sección
- h    fisura de hendimiento horizontal
- v    fisura de hendimiento vertical entre cordones

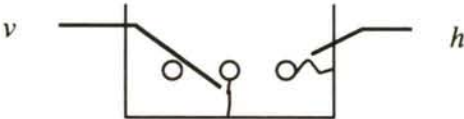


Figura 2.5.1.1.1-1

El autor plantea un modelo biela-tirante, para explicar la aparición de este tipo de fisuras de hendimiento, horizontales y verticales (Figura 2.5.1.1.1-2).

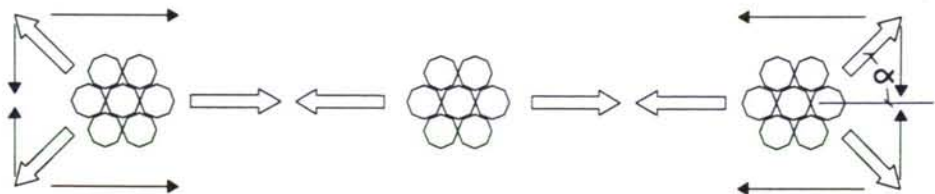


Figura 2.5.1.1.1-2

### Resumen crítico

- En la investigación llevada a cabo, según el mismo autor, no se tienen en cuenta los efectos diferidos sobre la longitud de transmisión y anclaje.
- En los ensayos pull-out, la curva tensión de adherencia-deslizamiento del cordón, una vez se ha producido deslizamiento es decreciente.
- En los ensayos push-in, tras el deslizamiento generalizado de la probeta, se aprecia un crecimiento de la tensión de adherencia.
- En la tabla 2.5.1.1.1-1 se aprecia que se produce la fisuración horizontal con más frecuencia que la vertical. Resolviendo el modelo biela-tirante planteado en la Figura 2.5.1.1.1-3, siempre y cuando el ángulo  $\alpha$  sea menor que  $45^\circ$  las tensiones que se originan son superiores en la cara inferior,  $0.5t$ , que en el paramento lateral,  $(0.5 \operatorname{tg} \alpha)t$ .

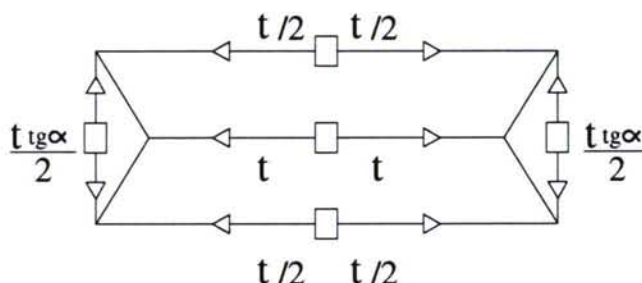


Figura 2.5.1.1.1-3

- En la investigación llevada a cabo no incluyó el efecto de la armadura de confinamiento (favorable respecto a la adherencia), por lo que no se contempla este efecto en la formulación del código modelo (CM90). El autor propone como futura línea de investigación el estudio de este efecto, y la futura inclusión de coeficientes correctores que tengan en cuenta este efecto.

#### 2.5.1.1.2. Planteamiento general del Código Modelo

El código modelo (CM90) realiza un planteamiento de la zona de anclaje conjunto para las estructuras de armadura pretesa y postesa: de hecho, los elementos de armadura postesa son casos particulares, en los que la longitud de transmisión es nula (DENU91).

El Código Modelo distingue dos regiones en la zona de anclaje, de diferentes propiedades, por lo que opta por el diagrama bilineal clásico para representar el crecimiento de la tensión del acero con la distancia medida desde el extremo de la viga.

La expresión que plantea para la longitud de anclaje es, por lo tanto:

$$l_{bpd} = l_{bpt} + \Delta l = l_{bpt} + l_{bp} \frac{\sigma_{pd} - \sigma_{pcs}}{f_{pd}}$$

donde:

$l_{bpd}$  longitud de anclaje de la tensión  $\sigma_{pd}$



- $l_{bpt}$  longitud de transmisión  
 $\Delta l$  longitud complementaria a tracción ("flexural bond length")  
 $\sigma_{pd}$  tensión del acero bajo carga de cálculo ( $\sigma_{pd} \leq f_{pd}$ )  
 $\sigma_{pcs}$  tensión del acero debida al pretensado, después de haberse producido las pérdidas  
 $f_{pd}$  límite elástico de cálculo del pretensado

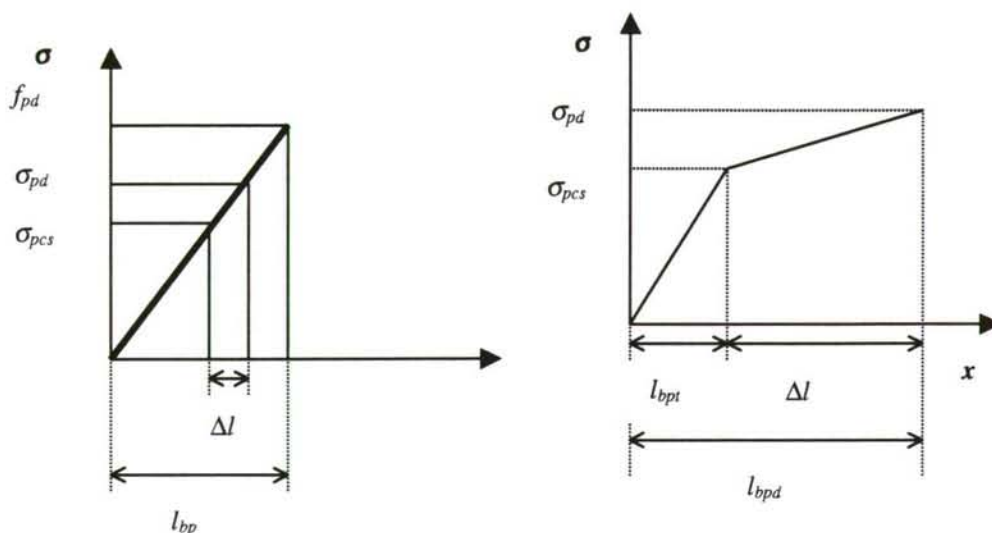


Figura 2.5.1.1.2-1

### 2.5.1.1.3. Resistencia de adherencia

La capacidad adherente de cálculo representa una cota inferior de la tensión de adherencia que es capaz de desarrollar la armadura activa en la situación "pull-out" (DENU91). Este valor viene dado por la siguiente expresión:

$$f_{bpd} = \eta_{p1} \eta_{p2} f_{ctd}$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk}(t)}{1.50}$$

donde:

- $f_{bpd}$  resistencia de adherencia de cálculo  
 $\eta_{p1}$  coeficiente corrector, función del tipo de pretensado (Tabla 2.5.1.1.3-1)  
 $\eta_{p2}$  coeficiente corrector, función de la posición del tendón (Tabla 2.5.1.1.3-2)  
 $f_{ctk}(t)$  resistencia característica a tracción del hormigón a la edad  $t$   
 $f_{ctd}$  resistencia a tracción de cálculo del hormigón

Tabla 2.5.1.1.3-1

Tipo de tendón de pretensado	$\eta_{p1}$
Alambres indentados o estampados	1.4
Cordones de 7 alambres	1.2

Tabla 2.5.1.1.3-2

Posición del tendón	$\eta_{p2}$
Inclinación entre 45° y 90° respecto de la vertical	1.0
Horizontales, que disten menos de 250 mm del fondo o que estén situados al menos 300 mm por debajo del punto más alto de sección	1.0
Demás casos	0.7

#### 2.5.1.1.4. Longitud de anclaje básica

La longitud básica de anclaje es la necesaria para anclar la tensión máxima de un cordón sin tensión, embebido en el hormigón (DENU91). El valor de la longitud de anclaje básica,  $l_{bp}$ , se emplea para deducir la longitud de transmisión y la longitud de anclaje de cálculo.

$$l_{bp} = \frac{A_{sp}}{\phi\pi} \frac{f_{ptd}}{f_{bpd}}$$

$$f_{ptd} = \frac{f_{ptk}}{1.15}$$

donde:

$l_{bp}$  = longitud de anclaje básica

$f_{ptd}$  = fuerza máxima del acero de pretensado

Tabla 2.5.1.1.4-1

Tipo de tendón	$\frac{A_{sp}}{\phi\pi}$
Tendón de sección circular	$\frac{\phi}{4}$
Cordón de 7 alambres	$\frac{7}{36}\phi$

#### 2.5.1.1.5. Longitud de transmisión

$$l_{bpt} = \alpha_8 \alpha_9 \alpha_{10} l_{bp} \frac{\sigma_{pi}}{f_{pd}}$$

$$\delta_e < 0.5 \frac{\sigma_{pi}}{E_p} l_{bpt}$$

donde:

$\alpha_8, \alpha_9, \alpha_{10}$  coeficientes correctores, que tienen en cuenta la forma de transferencia (gradual o súbita), el tipo de comprobación, y el tipo de pretensado (alambre o cordón), Tablas 2.5.1.1.5-1, 2.5.1.1.5-2 y 2.5.1.1.5-3

$l_{bpt}$  longitud de transmisión

$\sigma_{pi}$  tensión del acero inmediatamente antes de la transferencia



$l_{bp}$	longitud de anclaje básica
$f_{pd}$	tensión máxima del tendón de cálculo
$\delta_e$	penetración de los tendones en la cara final del elemento de hormigón

Tabla 2.5.1.1.5-1

Forma de transferir el pretensado	$\alpha_8$
Transferencia gradual	1
Transferencia súbita	1.25

Tabla 2.5.1.1.5-2

Tipo de comprobación	$\alpha_9$
Comprobación frente a momento y cortante	1.0
Cálculo de la armadura transversal en la zona de anclaje	0.5

Tabla 2.5.1.1.5-3

Tipo de tendón	$\alpha_{10}$
Cordones de pretensado	0.5
Alambres indentados y estampados	0.7

Para determinar las fuerzas de estallido y exfoliación para dimensionar la armadura de confinamiento necesaria, establece expresiones deducidas de modelos biela-tirante.

Si existe armadura que confine el pretensado, se considera que esta armadura absorberá las fuerzas de hendimiento.

En ausencia de armadura transversal de confinamiento, el Código Modelo establece que el recubrimiento mínimo de hormigón para evitar fisuración por hendimiento ha de ser (Tabla 2.5.1.1.5-4):

Tabla 2.5.1.1.5-4

Distancia libre entre cordones	Recubrimiento
$\geq 3\phi$	$\geq 3\phi$
$< 3\phi$	$\geq 4\phi$

#### 2.5.1.1.6. Longitud de desarrollo

Se define longitud de desarrollo como la distancia desde la cara final de la pieza hasta la sección de hormigón a partir de la cual la distribución de tensiones se puede considerar lineal.

Para una sección rectangular y cordones rectos de pretensado situados cerca del borde inferior de la sección de hormigón, la longitud de desarrollo,  $l_p$ , es:

$$l_p = \sqrt{h^2 + (0.6l_{bpt})^2} \leq l_{bpt}$$

donde:

$h$  canto total de la sección de hormigón

Para secciones no rectangulares la longitud de desarrollo se puede obtener de forma similar a la usada para armadura postesa.

### 2.5.1.2. Eurocódigo 2, UNE-ENV 1991-1-1, UNE-ENV 1992-1-3 y UNE-ENV 1992-1-4

En el Eurocódigo 2, parte 1 (E21193) se denomina longitud de dispersión a la longitud necesaria para que las tensiones en el hormigón alcancen gradualmente una distribución lineal (longitud de desarrollo). Para sección rectangular, con pretensado recto situado cercano al extremo (CM90) inferior de la sección, se toma:

$$l_{p,eff} = \sqrt{l_{bp}^2 + d^2}$$

$l_{p,eff}$  longitud de dispersión

$d$  canto útil

Longitud de anclaje,  $l_{ba}$ , como la necesaria para transmitir íntegramente al hormigón la fuerza última del tendón  $F_{pu}$ .

#### 2.5.1.2.1. Longitud de transmisión

El Eurocódigo plantea dos opciones (Figura 2.5.1.2.1-1):

- Crecimiento lineal de la fuerza de pretensado.
- Crecimiento parabólico de la fuerza de pretensado, más preciso.

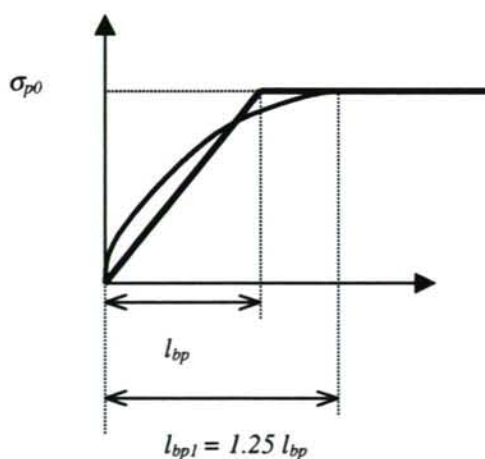


Figura 2.5.1.2.1-1

$$l_{bp} = \beta_b \cdot \phi$$

donde:

$l_{bp}$  longitud de transmisión



- $\beta_b$  coeficiente experimental que depende del tipo de tendón de pretensado, y de la resistencia del hormigón en el momento de la transferencia
- $\phi$  diámetro nominal del cordón de pretensado

Según lo establecido por la norma UNE-ENV 1992-1-3, Reglas Generales, Elementos y Estructuras Prefabricados de Hormigón, el coeficiente  $\beta_b$  para cordones normales de sección transversal  $\leq 150 \text{ mm}^2$ , que cumplan con las características superficiales especificadas en las normas aplicables, tesados de acuerdo con los valores indicados en la Norma Experimental ENV 1992-1-1, viene dado por la Tabla 2.5.1.2.1-1:

Tabla 2.5.1.2.1-1

Resistencia del hormigón en la transferencia (MPa)		25	30	35	40	45	54
$\beta_b$	Cordones y alambres lisos o indentados, $\sigma_{p0} = 0.8 f_{pk}$	75	70	65	60	55	50

Como valor de cálculo  $l_{bpd}$  se tomará el valor más desfavorable entre  $0.8l_{bp}$  o  $1.2l_{bp}$ , desde el punto en que la adherencia comienza a ser efectiva.

Para considerar el comienzo de la adherencia se tendrá en cuenta:

- Los tendones no adheridos intencionadamente en el extremo.
- Una zona neutralizada de longitud  $l_{bp0}$ , en el caso de que se produzca un deslizamiento repentino.

Para cálculos más precisos, se puede suponer un incremento parabólico de la fuerza de pretensado. En tal caso, la longitud de transmisión calculada por el procedimiento anteriormente expuesto se deberá incrementar en un 25%, tal y como se refleja en la Figura 2.5.1.2.1-1.

#### 2.5.1.2.2. Longitud de anclaje

El anclaje de los cables de pretensado en los elementos sometidos a flexión en estado límite último depende de la situación, fisurado o no fisurado, de la zona de anclaje. La parte de la viga donde los tendones se anclan puede considerarse no fisurada si las tensiones principales de tracción del hormigón en ELU no supera  $f_{ctd}$ , bajo la acción de  $P_d$ .

$\sigma_c \leq f_{ct0.05}$  Se considera que las condiciones de adherencia se satisfacen. No es necesario efectuar comprobaciones ulteriores.

$\sigma_c > f_{ct0.05}$  Deberá comprobarse que la resultante de la envolvente de las tensiones de tracción es absorbida por las armaduras activas y pasivas de la zona de anclaje.

El incremento de pretensado se puede considerar lineal a lo largo de la longitud de transmisión  $l_{bp}$ .

Para el segundo caso, la fuerza resistente última de los tendones puede determinarse de acuerdo con las Figuras 2.5.1.2.2-1 y 2.5.1.2.2-2:

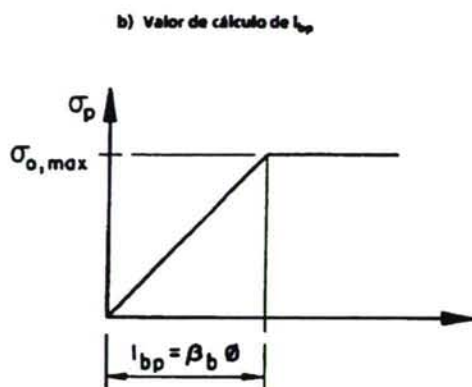


Figura 2.5.1.2.2-1: (E21193)

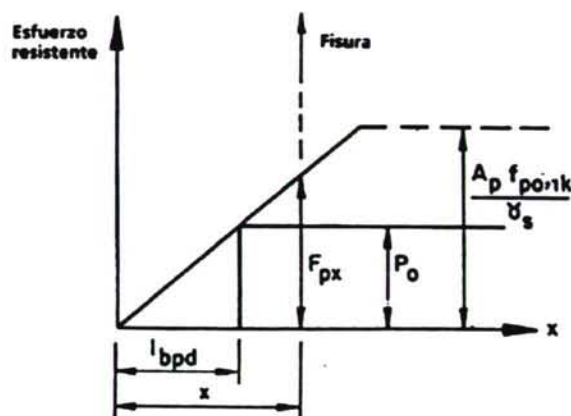


Figura 2.5.1.2.2-2 (E21193)

$$F_{px} = \frac{x}{l_{bpd}} P_0 \leq \frac{A_p f_{p0,1k}}{\gamma_s}$$

### 2.5.1.2.3. Elementos prefabricados

El Eurocódigo 2 Parte 1-3 (E21395): Reglas Generales, Elementos y Estructuras Prefabricados de Hormigón, establece unas consideraciones adicionales:

- Deberá el anclaje del esfuerzo de tracción,  $T_{dx}$ , debido a la carga, en el estado límite último. El esfuerzo de tracción se puede calcular de una manera simplificada mediante la expresión:

$$T_{dx} = \frac{M_{sd}(x)}{z} + V_{sd}(x) \cotg \theta$$

donde:

- $x$  distancia desde el eje de apoyo
- $M_{sd}(x)$  momento flector aplicado en la sección  $x$
- $z$  brazo mecánico
- $V_{sd}(x)$  esfuerzo cortante aplicado en la sección  $x$
- $\theta$  ángulo que forman las bielas de hormigón con el eje longitudinal de la pieza.  
Para piezas sin armadura de cortante,  $\cotg \theta$  se tomará igual a 1.0

- Cuando la tensión de tesado inicial sea mayor de  $0.8 f_{pk}$ , se multiplicará la longitud de transmisión por el valor  $\frac{\sigma_{p0}}{0.8 f_{pk}}$ .

Alternativamente al método de la Parte 1-1, para cálculos más precisos, puede suponerse un incremento parabólico alternativo, según la Figura 2.5.1.2.3-1:



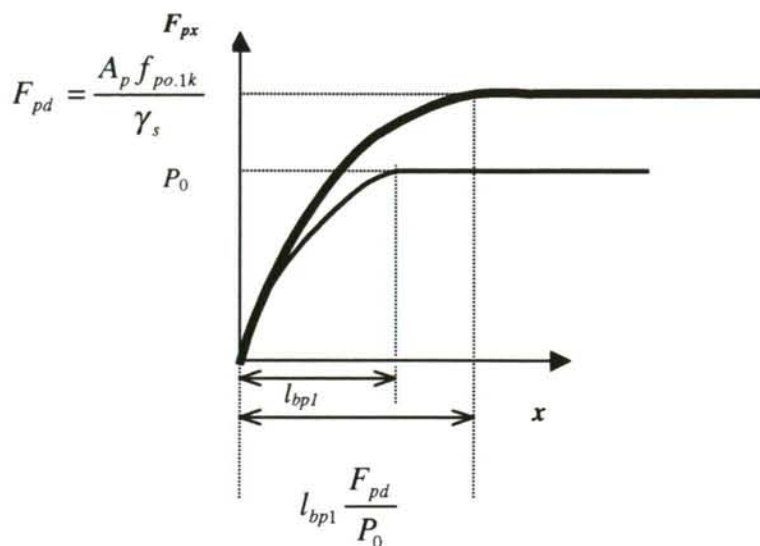


Figura 2.5.1.2.3-1

#### 2.5.1.2.4. Hormigón ligero

En el Apartado 4.2.3.5.6 de la parte 1-4: Reglas Generales. Hormigón de Árido Ligero de Estructura Cerrada (E21496), aparece:

Para hormigones ligeros de estructura cerrada, se reemplaza la ecuación 4.12 por:

$$l_{bp} = \frac{1}{\eta_1} \beta_b \phi$$

$$\eta_1 = 0.40 + 0.60 \frac{\rho}{2200}$$

$\rho$  límite superior de la densidad seca indicada en la tabla 3.105, en  $\text{kg/m}^3$

#### 2.5.1.3. EHE: Instrucción de Hormigón Estructural

##### 2.5.1.3.1. Borrador de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE

En el borrador de la EHE, de 24 de junio de 1997 (EHE97), en el Artículo 32º, Apartado 8, se especificaban las características que deben poseer las armaduras para poder ser ancladas por adherencia.

En ese apartado se establecía que “las armaduras destinadas a ser ancladas por adherencia deberán poseer unas características adherentes, definidas por su longitud de transmisión y anclaje, que les hagan adecuadas para su utilización en la forma prevista”.

En los comentarios se añadía que “Se consideran adecuadas para su anclaje por adherencia las armaduras cuya longitud de anclaje resulte inferior a 100 diámetros en el

caso de alambres aislados, y a 150 veces el diámetro de cada uno de los alambres individuales si se trata de cordones”.

Este apartado no se incluyó en la EHE.

### 2.5.1.3.2. Instrucción de Hormigón Estructural EHE

En la EHE (EHE98), el Artículo 61° establece que la zona de anclaje de las armaduras activas es una región  $d$ , por lo que para su estudio deberán aplicarse los métodos de biela-tirante para su comprobación es Estado Límite Último, o bien resultados experimentales.

$$d = h + l_{bpt}$$

donde:

$h$  canto total de la pieza

$l_{bpt}$  longitud de transferencia de la armadura activa

En el Artículo 67° se definen las longitudes de transmisión y anclaje. La longitud de anclaje se define como la longitud necesaria para garantizar la resistencia del anclaje por adherencia, hasta la rotura del acero. Se establece que dichos valores se determinarán, en general, experimentalmente.

El planteamiento de los comentarios al Artículo 67° de la EHE relativo a la longitud de anclaje se basa en el Código Modelo 90 (CM90). Por una parte, la EHE, en el Artículo 67.4, en los comentarios, dispone que la longitud de transferencia se puede calcular como sigue:

$$l_{bpt} = \frac{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \phi \sigma_{pi}}{4 f_{bpd}(t)}$$

$l_{bpt}$  longitud de transferencia

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  coeficientes correctores, que tienen en cuenta la forma de transferencia (gradual o súbita), el tipo de comprobación, y el tipo de pretensado (alambre o cordón), Tabla 2.5.1.3.2-1

$\sigma_{pi}$  tensión del cable en el momento de la transferencia

$f_{bpd}(t)$  tensión de cálculo de adherencia en el momento de la introducción del pretensado, Tabla 2.5.1.3.2-2



Tabla 2.5.1.3.2-1

Descripción	Término	Valores adoptados
Coeficiente que tiene en cuenta la forma de transferencia de pretensado	$\alpha_1$	1 (transferencia gradual)
		1.25 (transferencia súbita)
Coeficiente según comprobación de estado límite de servicio o estado límite último	$\alpha_2$	0.5 (E.L.S.)
		1 (E.L.U.)
Coeficiente que tiene en cuenta el tipo de armadura pretesa	$\alpha_3$	0.5 (cordones de pretensado)
		0.7 (alambres grafilados)

En el caso de cordones de pretensado, para una edad de 28 días, se tiene:

Tabla 2.5.1.3.2-2

$f_{ck} =$	MPa	25	30	35	40	45	50
$f_{bpd(28)} =$	MPa	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.6

Para edades diferentes de 28 días deberá estimarse el valor de la tensión de adherencia de cálculo de acuerdo con la velocidad de crecimiento de la resistencia a tracción del hormigón.

Se define posición I, de adherencia buena, aquella de las armaduras que durante el hormigonado forman con la horizontal un ángulo comprendido entre 45° y 90° o que en el caso de formar un ángulo menor de 45°, están situadas en la parte inferior de la sección o a una distancia igual o mayor a 30 cm de la cara superior de una capa de hormigonado.

Se define posición II, de adherencia deficiente, para las armaduras que, durante el hormigonado, no se encuentren en ninguno de los casos anteriores (EHE98, Art. 66.5.1). Para armaduras en posición II (nuestro caso) se multiplicará el valor de la tabla por 0.7.

La longitud de anclaje se calcula mediante la expresión<sup>2.7</sup>:

$$l_{bpd} = l_{bpt} + \alpha_4 \phi \frac{(\sigma_{pd} - \sigma_{pcs})}{4f_{bpd}^*}$$

donde:

- $l_{bpd}$  longitud de anclaje
- $l_{bpt}$  longitud de transferencia

<sup>2.7</sup> Adoptamos esta notación en este trabajo.

$\alpha_4$	coeficiente corrector, función del tipo de armadura pretesa, Tabla 2.5.1.3.2-3
$\phi$	diámetro nominal del cordón o diámetro del alambre
$\sigma_{pd}$	tensión de la armadura activa al anclar
$f_{bpd}^*(t)$	tensión de cálculo de adherencia en el momento de la introducción del pretensado
$\sigma_{pcs}$	tensión de la armadura activa en el momento de la comprobación, teniendo en cuenta las pérdidas ocurridas

Tabla 2.5.1.3.2-3

Descripción	Término	Valores adoptados
Coeficiente que tiene en cuenta el tipo de armadura pretesa	$\alpha_4$	0.8 (cordones de pretensado)
		1.0 (alambres grafilados)
Tensión de cálculo de adherencia en el momento de la introducción del pretensado	$f_{bpd}^*(t)$	$f_{bpd}(t)$ (cordones en posición I)
		$0.7 f_{bpd}(t)$ (cordones en posición II)

Para determinar la velocidad de crecimiento de  $f_{bpd}(t)$  con el tiempo, la norma establece que será la misma secuencia de crecimiento que la de la resistencia a tracción, Apartado 30.4.c. El caso de hormigones de endurecimiento rápido no está contemplado en este punto, por lo que se deberá determinar experimentalmente, lo que haremos como paso previo a la vía 1.

Esta variable depende de la resistencia característica del hormigón, de la posición de la armadura (posiciones 1 y 2), y su crecimiento hasta el valor máximo de la tabla se equipara a la velocidad de crecimiento de la resistencia a tracción.

### 2.5.1.3.3. Comentarios a la norma EHE

Queda patente el vacío normativo relativo a la determinación experimental de longitud de transmisión, y de anclaje de los cordones de pretensado de gran tamaño.

La definición de longitud de anclaje de la EHE no coincide con la habitual (véase Apartado 2.1), ni es coherente con el planteamiento de ELU's, ni de ELS's.

Considerando el ELU de solicitaciones normales, planteando los dominios de rotura: el pretensado está anclado en el dominio 4, si es capaz de desarrollar la deformación de rotura correspondiente al plano de rotura. En el dominio 3, el pretensado ha de ser capaz de plastificar, para garantizar la capacidad resistente de la sección. En el dominio 2, el pretensado ha de ser capaz de alcanzar un incremento de deformación (además de la



deformación correspondiente a la fuerza de neutralización) del 0.1% en rotura. Acorde con este planteamiento, la longitud de anclaje depende del dominio de rotura, lo que difiere de la definición de la EHE.

Realmente, el único ensayo que se podría efectuar con un coste razonable sería un ensayo de tracción directa, para determinar la longitud de anclaje de la carga unitaria máxima (deformación máxima total del pretensado del orden del 3%). En caso de plantear ensayo de vigas, sería prácticamente imposible conseguir, con varios cordones de pretensado en la parte traccionada, una rotura tan dúctil. El canto necesario sería desproporcionado y, por lo tanto, la carga de rotura y flechas serían enormes.

Es necesario establecer la forma de crecimiento de la fuerza de pretensado a lo largo de la longitud de anclaje, para poder evaluar la capacidad resistente a flexión y a cortante de cada sección. Para ello, se podrá plantear la inclusión de la comprobación del Eurocódigo (E21193) de la fuerza anclada en cada sección, basada en la deducción de la tensión de adherencia.

#### 2.5.1.4. ACI 318-99

La normativa estadounidense (ACI99) establece que la longitud de anclaje de diseño no será menor que:

$$l_d = \frac{1}{3} f_{pe} \cdot d_b + (f_{ps} - f_{pe}) \cdot d_b$$

$$l_t = \frac{1}{3} f_{pe} \cdot d_b$$

donde:

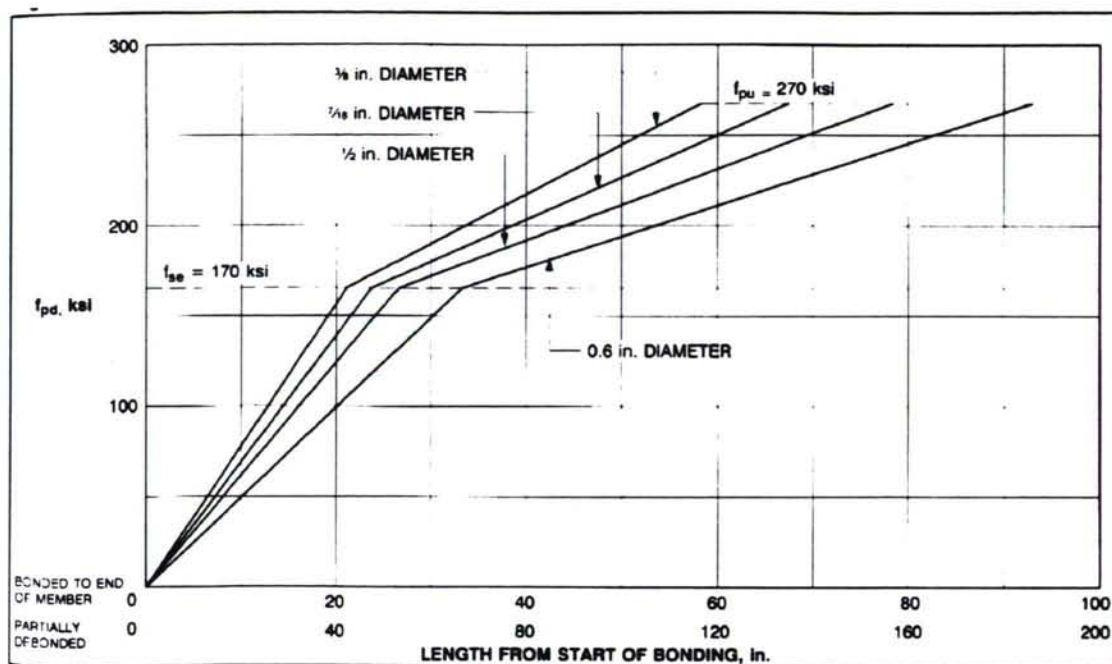
- $d$       diámetro del cordón
- $l_d$      longitud de anclaje (in)
- $l_t$      longitud de transmisión (in)
- $f_{pe}$     tensión del cordón de pretensado sin tener en cuenta las pérdidas de pretensado (ksi)
- $f_{ps}$     tensión en el cordón de pretensado, durante la acción de las cargas exteriores (ksi)

En caso de que el pretensado no se extienda hasta el extremo del elemento, y se permitan tracciones en la parte menos comprimida de la sección durante el servicio, se duplicará la longitud de anclaje de diseño obtenida con la fórmula anterior.

La AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) adopta la misma fórmula.

#### 2.5.1.5. PCI Design Book

El PCI considera la expresión de la normativa ACI (véase la Figura 2.5.1.5-1), pero comenta (PCID99 11-23) que la ecuación se dedujo de los resultados experimentales con cordones de 0.25", 3/8" y 0.5", por lo que para otros cordones superiores es necesario realizar una extrapolación. Se indica que está en curso una investigación para confeccionar unas recomendaciones para cordones recubiertos de epoxi.



CURVES BASED ON SECT. 12.9.1, ACI 318-95. NOTE ACI SECT. 12.9.3 FOR STRANDS WHICH ARE DEBONDED NEAR MEMBER ENDS.

Figura 2.5.1.5-1: (PCID99)

## 2.5.2. OTRAS EXPRESIONES DE LAS LONGITUDES DE TRANSMISIÓN Y ANCLAJE

En este apartado vamos a proporcionar las fórmulas empíricas para la evaluación de la longitud de transmisión, deducidas por diversos autores o adoptadas por determinadas normativas.

Denominaremos pretensado efectivo, y lo denotaremos mediante  $f_{se}$ , a la tensión remanente en un cordón tras deducir la totalidad de las pérdidas debidas al acortamiento elástico, fluencia y retracción del hormigón, y a la relajación del acero. La tensión efectiva de pretensado se puede determinar aplicando la compatibilidad de deformaciones entre el hormigón y el acero en una sección transversal interior a la viga, más allá de la longitud de transmisión.

Para una sección transversal con pretensado centrado, sin armadura pasiva, en la que no se produzca deslizamiento relativo apreciable entre hormigón y pretensado, la tensión efectiva de pretensado inmediatamente después de la transferencia viene dada por la fórmula:

$$f_{se} = \frac{0.75 f_{p \text{ máx}}}{\left[ 1 + \left( \frac{E_p}{E_{ci}} \right) \left( \frac{A_s^*}{A_{ce}} \right) \right]}$$

donde:

$f_{se}$  pretensado efectivo, tras pérdidas instantáneas (ksi)

$f_{p \text{ máx}}$  tensión máxima del pretensado (ksi)

$A_{ce}$  área neta de hormigón de la sección transversal



$E_p$	módulo de deformación del cordón de pretensado
$E_{ci}$	módulo de deformación del hormigón a la edad de transferencia
$A_s^*$	área de pretensado

Zia y Moustafa (ZIA77) aplicaron diversos análisis de regresión lineal a los resultados experimentales obtenidos por otros investigadores, observando que la longitud de transmisión se ajustaba más a la tensión de pretensado antes de la transferencia,  $f_{si}$ , y a la resistencia del hormigón a la edad de transferencia,  $f'_{ci}$ , en vez de los habitualmente adoptados por las normativas,  $f_{se}$  y  $f_{c28}$ . Para transferencia de pretensado súbita propusieron la siguiente expresión para determinar la longitud de transmisión de cordones no revestidos:

$$l_t = 1.5 \frac{f_{si}}{f'_{ci}} D - 4.6$$

donde:

$l_t$	longitud de transmisión (in)
$f_{si}$	tensión de pretensado antes de la transferencia (ksi)
$f'_{ci}$	resistencia a compresión del hormigón a la edad de transferencia (ksi)
$D$	diámetro del cordón de pretensado (in)

Mitchell et al. (MITC93), tras estudiar la influencia de los hormigones de alta resistencia en las longitudes de transmisión y de anclaje, propusieron la siguiente fórmula empírica para deducir la longitud de transmisión de cordones de pretensado sin revestimiento, y transferencia de pretensado gradual:

$$l_t = \frac{f_{si} D}{3} \sqrt{\frac{20.7}{f'_{ci}}}$$

Esta fórmula fue deducida mediante el método de ajuste de pendientes ("slope intercept"), descrito en otro apartado de este apartado.

Cousins et al. (COUS90a) desarrollaron un modelo analítico para la transferencia de la fuerza de pretensado. El modelo consideraba la longitud de transferencia dividida en una zona elástica y una zona plástica. La ecuación que propusieron, deducida de resultados experimentales propios y de otros investigadores, es válida tanto para cordones recubiertos de mortero epoxi, como para cordones sin revestimiento:

$$l_t = \left( \frac{0.5 U'_t \sqrt{f'_{ci}}}{B} \right) + \left( \frac{f_{se} A_s^*}{\pi D U'_t \sqrt{f'_{ci}}} \right)$$

donde:

$B$	módulo de adherencia de la zona elástica en la longitud de transferencia. Cousins et al. proponen asumir un valor de 0.0814 MPa/mm
$U'_t$	parámetro adimensional de adherencia de la zona plástica de la longitud de transmisión, inversamente proporcional a $\sqrt{f'_{ci}}$

$U'_t = 0.556$	cordón no revestido
$U'_t = 0.880$	cordón recubierto de mortero epoxi de baja densidad
$U'_t = 1.370$	cordón recubierto de mortero epoxi de media a alta densidad

En las directrices del PCI de 1993 se contemplan los efectos de un único cordón y múltiples cordones revestidos de mortero epoxi en una sección. Según la separación entre los cordones, propone dos fórmulas:

$L_t = 50D$	Para cordón único o cordones con separación mínima y recubrimientos que cumplen lo establecida en las propias directrices.
$L_t = 65D$	Para cordones que no cumplan los requisitos de separación mínima y/o recubrimientos mínimos.

La FHWA (FHWA94), en el informe resultante de las investigaciones realizadas durante los años precedentes en diversas universidades, realiza una crítica y valoración de los resultados de las investigaciones llevadas a cabo. Finalmente, recomienda a la ACI la adopción de la siguiente expresión para la determinación de la longitud de anclaje:

$$L_d = \frac{f_{st} d_b}{3} + \lambda (f_{ps} - f_{se}) d_b$$

$$\lambda = 0.6 + 40 \epsilon_{ps}$$

donde  $\epsilon_{ps}$  es la deformación correspondiente a  $f_{ps}$ .  $\lambda$  es un coeficiente corrector, que realmente introduce una corrección a la tensión de adherencia de la longitud de anclaje, de modo que la tensión de adherencia disminuye a medida que aumenta el valor de  $f_{ps}$ . De esta forma se tiene en cuenta que realmente la fuerza de pretensado a lo largo de la longitud complementaria a tracción no es lineal, sino que presenta pendiente decreciente.

### 2.5.3. RESUMEN DE LOS FACTORES CONSIDERADOS POR LAS DISTINTAS NORMATIVAS

Los factores que tienen en cuenta las diferentes normativas están contenidos en la Tabla 2.5.3-1.

Se puede observar que:

- Algunos factores identificados como determinantes de la adherencia no aparecen reflejados en ninguna de las formulaciones reflejadas.
- La formulación más completa es la del CM-90 (que es la que recomienda la EHE en los comentarios del Artículo 67º) y la de los Eurocódigos. Sin embargo, el CM-90 no tiene en cuenta el enfundado parcial de los cordones de pretensado, ni la influencia de la armadura pasiva en la longitud de transmisión y complementaria a tracción.
- Ninguna de las normativas hace referencia a la consistencia del hormigón durante la colocación, ni al tipo de curado.



- En ninguna formulación se tiene en cuenta de manera rigurosa el carácter de las cargas actuantes: estáticas o dinámicas.
- Tan sólo la ACI tiene en cuenta la clase de pretensado (si bien la EHE ha abandonado la denominación, el concepto es muy aclaratorio), definición relativa a la probabilidad del hormigón de presentar fisuración a flexión. Este efecto produce un empeoramiento de la adherencia.
- Ninguna de las normativas contempla el empleo de cordones recubiertos de epoxi.
- Ninguna de las normativas contempla el efecto del recubrimiento del pretensado.
- Tan sólo una normativa, el Eurocódigo, contempla el caso de los hormigones ligeros.

Tabla 2.5.3-1

Normativa	CM-90 / EHE98 (den Uijl)	EUR	ACI	ZIA77	MITC93	COUS90b	FHWA
Diámetro del cordón de pretensado	X	X	X	X	X	X	X
Tensión inicial de tesado	X	X	X	X	X		X
No linealidad zona complementaria a tracción							X
Tensión del pretensado en rotura	X	X	X				X
Pérdidas de pretensado	X	X	X		X		X
Edad de transferencia	X	X	X				X
Tipo de transferencia: gradual o súbita	X	X					
Edad de ensayo/puesta en carga	X	X					
Tipo de pretensado: alambre o cordón	X	X	X				
Rugosidad superficial	X						
Verticalidad del cordón respecto a horizontal	X						
Espesor de hormigón debajo del cordón considerado	X						
Recubrimiento	X						
Separación entre cordones	X						
Consistencia del hormigón durante la colocación							
Compacidad del hormigón alrededor del cordón							
Presencia de armadura de confinamiento							
Resistencia del hormigón a compresión		X		X	X	X	
Resistencia a tracción	X	X					
Rigidez del hormigón							
Tipo de comprobación: fisuración o rotura	X	X					
Retracción							
Fluencia							
Efecto dinámico de las cargas aplicadas							
Enfundado parcial del cordón		X	X				
Cercanía de la viga a la zona de corte							
Longitud de cable libre entre vigas							
Recubrimiento con mortero epoxi						X	
Tratamientos térmicos: curado acelerado							
Tipo de hormigón: ligero o convencional		X					

## 2.6. CUESTIONES SIN RESOLVER

Una vez hecho el repaso del estado del conocimiento, quedan por resolver las siguientes preguntas:

- La adherencia del pretensado carece de un ensayo representativo, sencillo y barato para evaluar la capacidad adherente de cordones de pretensado de gran tamaño/hormigón. Es necesario un ensayo que permita establecer la compatibilidad del conjunto hormigón/pretensado. La fabricación de prismas o vigas son ensayos caros, poco aptos para su normalización.
- No existen criterios para evaluar en fábrica la adherencia adecuada/no adecuada, o criterios de aceptación o rechazo de elementos que presente fisuración tras la transferencia. Es necesario buscar métodos sencillos de control de calidad de la adherencia a través de la medida de los deslizamientos/flechas.
- La estimación de la longitud de transmisión se basa en tres métodos con una componente subjetiva (véase Apartado 2.4.2), que no tienen en cuenta los efectos del peso propio en elementos de pretensado excéntrico. Además, se presupone que la ley de deformaciones del hormigón se compone de tramos lineales, lo que dista de estar probado. Es necesario buscar un procedimiento de estimación de la longitud de transmisión objetivo, que permita detectar falta de adherencia de la zona de transmisión, y que permita cribar las deformaciones producidas por el peso propio.
- No tenemos conocimiento de ninguna normativa, recomendación o criterios de diseño de la zona de anclaje de grandes elementos pretensados de hormigón ligero.
- No tenemos conocimiento de ningún modelo analítico o numérico que tenga en cuenta los diversos factores que influyen en la adherencia.
- No se ha encontrado ningún método para evaluar la capacidad adherente residual de la zona de anclaje de elementos pretensados que presenten fisuración en la zona de anclaje, en parte o a lo largo de toda su longitud.
- La normativa española es muy imprecisa en las exigencias de la zona de anclaje. Por ello se hace necesaria una investigación acorde con los procedimientos de fabricación y de diseño actuales en España, y un ajuste del Artículo 67º a los resultados de esta investigación y a la teoría de los estados límites.





## *Capítulo 3*

# **PLANIFICACIÓN DE ENSAYOS Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Una vez conocida la situación actual, tanto desde el punto de vista de la investigación como de las realizaciones, estamos en disposición de plantear los objetivos específicos de esta tesis. Se pretende realizar una investigación aplicada, por lo que se han desarrollado varias etapas que incluyen diversos ensayos sobre varios materiales. En esta situación se hace necesario ofrecer al lector una visión general de las fases de los ensayos, de las variables estudiadas y de las consideraciones que guiaron el camino experimental.

Se pueden clasificar los ensayos de evaluación de la capacidad adherente del pretensado y el hormigón en tres grupos:

- Ensayos realizados en pórtico: se trata de ensayos realizados a escala, sobre probetas que no son propiamente elementos pretensados. Según se ha visto dentro de este tipo de ensayos se establece una diferenciación según el cordón de pretensado haya sido tesado previamente al hormigonado o no.
- Ensayos realizados en prismas pretensados: en este documento se denomina así (siguiendo la nomenclatura de CHON91) a los elementos pretensados, con pretensado centrado. Estos elementos posibilitan el estudio de la zona de transmisión del pretensado, y permiten evaluar la tendencia del material a presentar fisuración por hendimiento. Sin embargo, no sirven para estudiar la zona de anclaje debido a su fragilidad.
- Fabricación de prototipos de vigas, o vigas reales destinadas al estudio de las propiedades adherentes: este tipo de elementos permite el estudio de la transmisión del pretensado y de la zona de anclaje. El estudio de la zona de transmisión se ve afectado por el efecto de las contraflechas tras la transferencia, lo que introduce deformaciones adicionales en el hormigón. Mediante el ensayo a flexión se puede evaluar el comportamiento a carga creciente, la ductilidad de la viga, y las propiedades y extensión de la zona complementaria a tracción.

### **3.1. OBJETIVOS PARTICULARES DE ESTA INVESTIGACIÓN**

Este trabajo se plantea en forma de estudio comparativo de las propiedades de adherencia de los hormigones pretensado ligeros de altas prestaciones iniciales, respecto a un hormigón convencional, de prestaciones en prefabricación constatadas, a fin de:

- Evaluar la viabilidad del empleo de hormigones ligeros para la construcción de vigas pretensadas de armadura pretesa de menor peso propio que las



convencionales, pero con una capacidad portante similar. El cordón de pretensado a estudiar es el de 15.2 mm de diámetro nominal (0.6”), el más empleado en España en grandes prefabricados.

- Investigar qué factores condicionan la capacidad adherente de los hormigones ligeros y del hormigón convencional de referencia.
- Establecer las bases de un método de ensayo de laboratorio representativo, fácilmente reproducible y económico, que permita evaluar las propiedades adherentes de los cordones de pretensado de siete alambres con el hormigón, con la intención de mejorar las recomendaciones existentes en la normativa.
- Comparar los resultados proporcionados por los distintos tipos de ensayo realizados sobre la zona de transmisión, como aparece reflejado en la Figura 3.1-1.



Figura 3.1-1

- Comparar los resultados proporcionados por los ensayos realizados sobre la zona de anclaje, tal y como aparece esquematizado en la Figura 3.1-2.

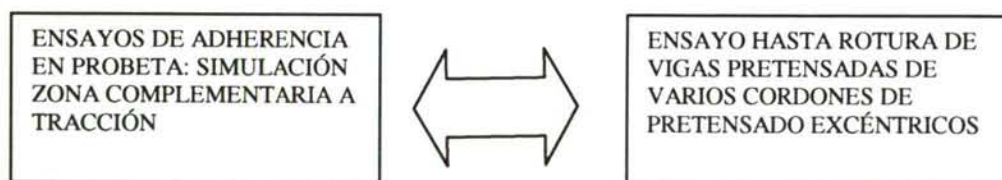


Figura 3.1-2

- Estudiar los mecanismos de fisuración por tensiones transversales en la zona de anclaje de tendones pretensados. Analizar las causas que motivan la fisuración de los elementos pretensados fabricados con hormigones ligeros, para de esta forma poder prevenirla.
- Desarrollar un modelo para diseñar y comprobar la adherencia de los elementos de hormigón ligero pretensado y hormigón convencional pretensado de altas resistencias iniciales.
- Estudiar el comportamiento a carga creciente de vigas pretensadas hasta rotura (fabricadas con ambos materiales), desde la fase no fisurada, analizando las deformaciones, la aparición y progresión de la fisuración hasta la rotura, y la influencia en ésta de la posible pérdida de adherencia.
- Intentar explicar algunos resultados contradictorios de ensayos recogidos en la literatura.

- Establecer criterios de diseño para garantizar un correcto funcionamiento de los elementos pretensados fabricados con hormigones ligeros de altas resistencias iniciales, que complementen a los ya existentes (E21496, E21193, CURR95).

## 3.2. DESARROLLO DE LOS ENSAYOS

Se puede considerar que la investigación llevada a cabo se desarrolló en dos fases, que se exponen a continuación.

### 3.2.1. PRIMERA FASE DE LA INVESTIGACIÓN

La compilación del conocimiento previo se orientó a las realizaciones de vigas pretensadas de hormigón ligero (en adelante se abreviará como HL). En el Capítulo 2 se ha visto que las referencias bibliográficas al respecto son escasas y relativamente antiguas. Ante la ausencia de información reciente y precisa al respecto se tomó la decisión de realizar un estudio comparativo, tomando como referencia una dosificación de hormigón convencional (HC) habitual en el campo de la prefabricación, de prestaciones constatadas.

El primer paso consistió en el establecimiento de las premisas de la investigación. Debido a las condiciones de acopio a la intemperie de la arcilla expandida en fábrica los valores de humedad del árido ligero (en adelante se podrá abreviar como A.L.) oscilan mucho<sup>3.1</sup>. El valor de la humedad de saturación de la arcilla expandida proporcionada por el suministrador, estimada mediante el ensayo ASTM C-127, es del 8.5% (ARLI96). Los valores elevados de humedad obedecen a la cantidad de agua capilar retenida entre los granos de árido.

La humedad del árido ligero condiciona el comportamiento de la dosificación (WEIG74), de modo que para cubrir todos los casos en la práctica se decidió ajustar una dosificación de hormigón ligero para árido ligero con una humedad de partida del 3% (HL3), y otra con el 10% (HL10). La única diferencia entre estas dosificaciones era la cantidad de agua de amasado añadida, en cada caso la necesaria para conseguir un asiento de cono de  $7.5 \pm 2.5$  cm a los 15 minutos del final del amasado.

La primera fase de la investigación consistió en la consecución de las dosificaciones de hormigón ligero, HL3-1 (HL con 3% de humedad en el árido ligero, primera dosificación) y HL10-1, con propiedades resistentes y de docilidad similares a las del HC a la edad de transferencia. En el Capítulo 4 se resumen las propiedades de estos materiales. Se adoptó como edad de transferencia de las vigas de hormigón ligero la habitual en la fabricación de vigas de HC, de dos días.

A continuación se abordó el estudio de las propiedades adherentes de los tres tipos de hormigón, mediante:

- Ensayos de adherencia en probeta (también denominados ensayos de adherencia en pósito en este trabajo) sobre cordón de pretensado previamente tesado. Estos ensayos, basados en los realizados por Abrishami y Mitchell (ABRI93) se describen en el Capítulo 5 y en el Anexo 2. Los resultados obtenidos se presentan en el Capítulo 6. Los ensayos realizados fueron:

<sup>3.1</sup> De hecho, el suministrador constató valores entre el 0% y el 22% en su acopio, durante el período comprendido entre enero y noviembre de 1997.



- Ensayos de simulación de la longitud de transmisión en pórtico, realizados a edad de transferencia prevista. También se les denomina ensayos de pórtico LT en este trabajo.
- Ensayos de simulación de la longitud complementaria a tracción en pórtico, realizados a los dos días del hormigonado (edad de transferencia prevista, que supone una cota inferior de la edad de puesta en carga de las vigas). También se les denomina en adelante ensayos de pórtico LC en este trabajo.
- Fabricación e instrumentación de prismas pretensados: empleando la nomenclatura de Chong (CHON91) se denomina así a los elementos pretensados de sección cuadrada, en este caso con un único cordón de pretensado centrado y sin armadura transversal. Estos ensayos se basaban en el procedimiento planteado por el Laboratoire de Ponts et Chaussées (LABO97), y en la norma UNE 7-436-82 inspirada en este último. El método de ensayo se describe en el Capítulo 7, y se detalla en el Anexo 3. Los resultados obtenidos se presentan en el Capítulo 8.

Tiempo después de la transferencia se detectaron fisuras longitudinales en todos los prismas de hormigón ligero fabricados. Las fisuras partían de los extremos, y avanzaban progresivamente, cada día varios centímetros, hasta abarcar la totalidad o al menos la mayor parte de la longitud de los prismas.

### 3.2.2. SEGUNDA FASE DE LA INVESTIGACIÓN

A la vista de esta tendencia del hormigón ligero a fisurar, se realizó un análisis de las posibles causas, y medidas destinadas a prevenir la fisuración longitudinal (Capítulo 8). Finalmente se plantearon tres posibles vías de continuación de la investigación:

- Vía 1: Estudio teórico y experimental de las propiedades diferidas del hormigón ligero a compresión y a tracción, comparativamente al hormigón convencional. Se realizó un análisis de los resultados proporcionados por la bibliografía (véase Apartado 2.3.3). Se obtuvieron valores de los coeficientes de cansancio de hormigones ligeros de dosificación y propiedades similares a los estudiados y se constató una mayor tendencia del hormigón ligero a presentar fenómenos de cansancio a tracción (FOUR85a y FOUR85b). A la vista de esto se consideró la posibilidad de aumentar la edad de transferencia, para aprovechar la mejora de las propiedades resistentes a tracción.
- Vía 2: La fisuración detectada se produjo en elementos con el recubrimiento adoptado en fábrica, pero sin armadura transversal en la zona de transmisión. En las vigas de producción existe una gran cuantía de armadura transversal en los extremos (usualmente la zona de máximo cortante). Se planteó la posibilidad de que la fisuración no se produjese en la realidad, o al menos se frenase su propagación gracias a la armadura de confinamiento de los extremos. Esta vía consistía en fabricar prototipos de vigas en fábrica, con el hormigón ligero de peores propiedades (HL10-1) y con diferentes cuantías de armadura de confinamiento.
- Vía 3: Esta opción consistía en la obtención de nuevas dosificaciones de hormigón ligero, de mejores propiedades resistentes. El objetivo sería obtener las dosificaciones de hormigón ligero de menor densidad (función objetivo). A partir de los resultados del estudio bibliográfico de la vía 1 se fijarían unas características resistentes mínimas (restricciones).

Antes de aumentar la edad de transferencia (vía 1) o descartar las dosificaciones de HL3-1 y HL10-1 (vía 3) se optó por explorar la vía 2. Se fabricaron e instrumentaron



doce vigas de hormigón ligero HL10-1, con cuatro cuantías de armadura de confinamiento diferentes (desarrollado en los Capítulos 9 y 10) en los extremos de cada viga. Se fabricaron tres vigas de cada tipo:

- Una viga se destinaría a estudiar la evolución de la longitud de transmisión con el tiempo, y, en su caso, se sometería a carga permanente para estudiar el comportamiento diferido.
- Una viga se ensayaría con carga simétrica centrada, para evaluar la capacidad resistente y la ductilidad.
- La tercera viga se ensayaría para intentar acotar superiormente la longitud de anclaje.

Tras la fabricación de las vigas se detectó la fisuración de todas las vigas de hormigón ligero HL10-1 en la cara inferior, fisuración que se generalizó en los meses siguientes a toda la longitud.

Se ensayó una viga de cada cuantía a carga centrada, para evaluar el comportamiento resistente, la ductilidad y la influencia de la fisuración existente (desarrollado en el Capítulo 10).

A la vista de estos resultados se decidió abordar la vía 3, es decir la búsqueda de nuevas dosificaciones de hormigón ligero (desarrollado en el Capítulo 8). Tras meses de investigación se adoptaron las dosificaciones HL10-2 y HL3-2, de mayor densidad<sup>3.2</sup> que las dosificaciones anteriores, y mejores características resistentes. Los componentes del hormigón se mantuvieron constantes, excepto el aditivo, que se reemplazó por un superfluidificante de mayor rendimiento, que permitía una reducción de agua de amasado superior (explicado en el Capítulo 4).

A continuación se procedió a fabricar las vigas de hormigón convencional, para completar el estudio comparativo, y en la misma serie vigas de hormigón ligero de la nueva dosificación HL10-2. La cuantía de armadura de confinamiento adoptada fue la máxima empleada en la serie anterior. Se fabricaron tres vigas de cada material, dispuestas simétricamente alrededor de la zona de corte de pretensado.

Se ensayaron dos vigas de cada material, para intentar acotar la longitud de anclaje. Los resultados de estos ensayos se reflejan en el Capítulo 10.

La campaña experimental, descrita en los siguientes Capítulos se prolongó a lo largo de dos años y medio.

### **3.3. VARIABLES ESTUDIADAS EN LA PRESENTE INVESTIGACIÓN**

En este apartado se resumen los principales parámetros en que se ha centrado la presente investigación (Tabla 3.3-1):

---

<sup>3.2</sup> La densidad de equilibrio de estos hormigones, de aproximadamente 20 kN/m<sup>3</sup> (véase Capítulo 4) implica que estos hormigones están teóricamente cubiertos por la EHE (EHE98, Art. 1).



Tabla 3.3-1: Variables estudiadas en la presente investigación

TIPO DE ENSAYO	Ensayo en prismas	Ensayo de adherencia en probeta: simulación zona transmisión	Ensayo de adherencia en probeta: simulación zona complementaria a tracción	Vigas
Tipo de ensayo	transmisión	"push-in"	"pull-out"	transmisión/flexión
Efecto del ensayo en la armadura activa (inferior)	Pérdida de tensión	Pérdida de tensión	Incremento de tensión	Incremento de tensión
Tipo de sollicitación	Axial Centrada	Axial Centrada	Axial Centrada	Flexión pura (zona central de la viga)
Tipo de hormigón	HC/HL.3-1/HL.10-1	HC/HL.3-1/HL.10-1/HL.10-2	HC/HL.3-1/HL.10-1/HL.10-2	HC/HL.10-1/HL.10-2
Tipo de pretensado: alambre o cordón	Cordón	Cordón	Cordón	Cordón
Diámetro del cordón de pretensado (mm)	15.2	15.2	15.2	15.2
Tensión inicial de tesado	$0.75 f_{p\max}$	$0.75 f_{p\max}$	$0.60 f_{p\max}$	$\approx 0.60 f_{p\max}$
Tipo de transferencia	Gradual	Gradual	—	Súbita
Tensión del pretensado en rotura	—	—	$f_{pk}$	$f_{pk}$
Edad de transferencia (días)	2	—	—	2/3
Edad de ensayo/puesta en carga	—	2/3	2/3	>28
Estado superficial del cordón	Ligeramente oxidado	Ligeramente oxidado	Ligeramente oxidado	Ligeramente oxidado
Posición del cordón durante el hormigonado	Horizontal	Vertical	Vertical	Horizontal
Espesor de hormigón debajo del cordón superior/inferior (mm)	50	—	—	50/325
Recubrimiento (mm)	45	67	67	42
Separación entre c.d.g. de cordones (mm)	—	—	—	50
Consistencia del hormigón durante la colocación P = plástica, B = blanda, F = fluida	B	B/F	B/F	P/B/F
Método de compactación/tiempo de vibrado por litro	Vibrador aguja de 25 mm 5 s/litro	Vibrador aguja de 25 mm 5 s/litro	Vibrador aguja de 25 mm 5 s/litro	Vibrador interno fábrica
Presencia de armadura de confinamiento	No	No	No	c6a10/c6a15/c8a20/c8a15
Tensión en el hormigón tras la transferencia	$0.4 f_{cj}$	$<< 0.4 f_{cj}$	—	$0.4 f_{cj}$
Esfuerzos actuantes $M_d$ $V_d$ durante ensayo	No	No	No	Sí
Número total de cordones de pretensado	1	1	1	4
Número de cordones de pretensado alineados	1	1	1	3
Número de cordones de pretensado superiores	0	—	—	1
Ensayo Estático/dinámico	Estático	Estático	Estático	Estático
Duración curado húmedo (horas)	20	20	20	3.3

3.3 Curado efectuado en las condiciones ambientales en fábrica.

### 3.4. NOTACIÓN Y NOMENCLATURA

La notación empleada en documento se resume en las Tablas 3.4-1 y 3.4-3.

*Tabla 3.4-1: Nomenclatura empleada*

Nomenclatura	Ensayo
P	Prisma
LT	Ensayo de adherencia en probeta: simulación zona transmisión
LC	Ensayo de adherencia en probeta: simulación zona complementaria a tracción
V	Viga
C	Convencional
L	Ligero
10	Humedad partida arlita 10%
3	Humedad partida arlita 3%
-1	Dosificación inicial
-2	Segunda dosificación

Un ejemplo de la nomenclatura empleada se presenta en la Tabla 3.4-2.

*Tabla 3.4-2: Ejemplo de la nomenclatura adoptada*

P3L101	Prisma 3, hormigón Ligero HL10-1
LT2L102-3D	ensayo LT, pórtico 2, hormigón HL10-2, edad de ensayo 3 Días
LC1L31-2D	ensayo LC, pórtico 1, hormigón HL3-1, edad de ensayo 2 Días
V7L10-1	Viga 7, hormigón HL10-1

*Tabla 3.4-3: Denominación de los ensayos*

Elemento/ensayo	Ordinal ensayo/ Elemento	Tipo de hormigón	Humedad inicial arlita	Dosificación	Edad de ensayo
LC	1	L	10	-1	2D
	2				
	3				
LT	4				
	5				
	6				
P	7	C	3	-2	3D
	8				
	9				
V	10				
	11				
	12				

El grado de ajuste entre una curva experimental y una aproximación teórica, se expresará mediante:

coeficiente  $R$  El coeficiente del momento de correlación del producto Pearson de una serie "y" respecto a una serie "x"



coeficiente  $R^2$  El cuadrado del coeficiente del momento de correlación del producto Pearson de una serie “y” respecto a una serie “x”

### 3.5. MAPA DE ENSAYOS

En la Tabla 3.5-1 se presenta un mapa de los ensayos realizados, a fin de facilitar la lectura e interpretación de este documento. En las últimas columnas se presentan los ensayos realizados, sobre el total de posibilidades.

3.5 MAPA DE ENSAYOS

MATERIAL	HORMIGÓN CONVENCIONAL DE REFERENCIA						HORMIGÓN LIGERO INICIAL						HORMIGÓN LIGERO DOSIFICACIÓN CORREGIDA						E. REALIZADOS	Nº TOTAL E.			
DOSIFICACIÓN AJUSTADA							HL3-1			HL10-1			HL3-2			HL10-2			4	5			
PRISMAS PRETENSADOS	2 DÍAS			3 DÍAS			2 DÍAS			3 DÍAS			2 DÍAS			3 DÍAS			2 DÍAS	3 DÍAS			
EDAD DE TRANSFERENCIA 2 DÍAS	P2C	P3C	P4C				P1L31	P2L31	P3L31				P1L01	P2L01	P3L01				2 DÍAS	3 DÍAS	9	30	
EDAD DE ENSAYO	2 DÍAS			3 DÍAS			2 DÍAS			3 DÍAS			2 DÍAS			3 DÍAS			2 DÍAS	3 DÍAS			
ENSAYO ZONA DE TRANSMISIÓN (LT)	LT1C	LT2C	LT5C	LT6C			LT131	LT231				LT1L01	LT2L01						2 DÍAS	3 DÍAS	10	20	
EDAD DE ENSAYO	2 DÍAS			3 DÍAS			2 DÍAS			3 DÍAS			2 DÍAS			3 DÍAS			2 DÍAS	3 DÍAS			
ENSAYO ZONA COMPLEMENTARIA A TRACCIÓN (LC)	LC1C	LC2C	LC5C	LC6C			LC131	LC231				LC1L01	LC2L01						2 DÍAS	3 DÍAS	10	20	
VIGAS PRETENSADAS PRIMERA SERIE	c6a15	c6a10	c8a20	c8a15			c6a15	c6a10	c8a20	c8a15		c6a15	c6a10	c8a20	c8a15				c6a15	c6a10	c8a20	c8a15	
EDAD DE TRANSFERENCIA 2 DÍAS												V1Q10-1 V1L10-1 V6L10-1 V4L10-1 V8L10-1	V12L10-1 V2L10-1 V8L10-1 V7L10-1 V3L10-1 V11L10-1				c6a15	c6a10	c8a20	c8a15	12	60	
VIGAS PRETENSADAS SEGUNDA SERIE	c6a15	c6a10	c8a20	c8a15			c6a15	c6a10	c8a20	c8a15		c6a15	c6a10	c8a20	c8a15				c6a15	c6a10	c8a20	c8a15	
EDAD DE TRANSFERENCIA 3 DÍAS				V4C V5C V6C																	V3L10-2 V2L10-2 V1L10-2	6	60

LEYENDA

ENSAYOS REALIZADOS

VIGA ENSAYADA A CARGA CENTRADA

VIGA CONSERVADA PARA EVALUAR EFECTOS DIFERIDOS

VIGA ENSAYADA BUSCANDO LONGITUD DE ANCLAJE

VIGA ENSAYO FALLIDO

AP

CUANTÍA DE ARMADURA DE PASIVA DE CONFINAMIENTO

c6a15

c

6 mm a

15 cm

1.89

CM2/M

c6a10

c

6 mm a

10 cm

2.51

CM2/M

c8a20

c

8 mm a

20 cm

2.83

CM2/M

c8a15

c

8 mm a

15 cm

3.35

CM2/M

2 DÍAS

TRANSFERENCIA REALIZADA A LOS 2 DÍAS DEL HORMIGONADO

3 DÍAS

TRANSFERENCIA REALIZADA A LOS 3 DÍAS DEL HORMIGONADO

ELEMENTO/ENSAYO

ORDINAL ENSAYO/ELEMENTO

TIPO DE HORMIGÓN

HUMEDAD INICIAL ARLITA

DOSIFICACIÓN

EDAD DE ENSAYO

LC

1

L

0

1

2

10

3

3

2D

4

0

2

5

10

LT

6

3

3D

7

C

8

P

9

10

11

V

12

P

PRISMA

LA

PÓRTICO ANCLAJE

LT

PÓRTICO TRANSMISIÓN

V

VIGA

"I"

ORDINAL DEL ENSAYO/ELEMENTO

C

CONVENCIONAL

L

LIGERO

0

10

HUMEDAD PARTIDA ARLITA 10%

3

HUMEDAD PARTIDA ARLITA 3%

1

DOSIFICACIÓN INICIAL

2

DOSIFICACIÓN FINAL



## Capítulo 4

# CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

### 4.1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de toda la investigación se ha mantenido una dosificación de un hormigón convencional de referencia, de 45/50 MPa de resistencia de proyecto.

El hormigón convencional (HC) está definido por su dosificación (véanse las proporciones correspondientes a aproximadamente un litro en la Tabla 4.1-1) en peso. Los áridos empleados en su fabricación son: arena caliza de Baralla (Lugo) 0-6, gravilla 6-12 y grava 12-18 de granito del Carqueixo (Lugo). Este hormigón presenta un asiento de cono de Abrams medio de  $7.5 \pm 2.5$  cm a los 15 minutos del final de amasado.

Tabla 4.1-1

Dosif.	Agua	Grava 12-18	Gravilla 6-12	Arena 0-6	Cemento I-52,5R	Fluidificante Melcret 222 (Bettor)
	g	g	g	g	g	g
HC	184	345	515	877	450	6

A la hora de plantear las dosificaciones de hormigón ligero, se tuvo en cuenta que la forma habitual de acopio de la arcilla expandida es el almacenamiento a la intemperie. La arcilla expandida es un material con una elevada porosidad superficial, lo que le confiere una gran capacidad de absorción de agua respecto a los áridos naturales: el agua absorbida por este material tras 24 horas de inmersión puede alcanzar entre el 12 y el 22% en volumen (WEIG74). Esta propiedad de la arcilla expandida, junto con las condiciones de almacenamiento motivan que la humedad de este material fluctúe enormemente entre verano e invierno: en verano la humedad de la arcilla expandida será baja en general, y en invierno se aproximará más o menos a los valores de saturación.

Es sabido que las propiedades del hormigón ligero, tanto en su estado fresco como en estado endurecido, dependen en grado sumo de la forma en que está distribuida el agua total dentro de la masa: agua contenida en los poros accesibles del árido ligero, en forma de humedad del mismo, y agua añadida durante el amasado. La suma de estas cantidades proporciona la cantidad de agua total de amasado (WEIG74).

Se denomina agua eficaz a la fracción de la cantidad de agua total que, dentro de la masa de hormigón fresco, es susceptible de combinarse con el cemento. Este agua está

presente en la masa de hormigón fresco, y proporciona trabajabilidad a la mezcla (WEIG74).

En los hormigones convencionales se considera que el agua retenida por los poros accesibles de los áridos es agua eficaz; de hecho habitualmente se descuenta la humedad de los áridos del agua total para determinar el agua que hay que añadir durante el amasado (WEIG74). En el caso de los hormigones ligeros se ha constatado experimentalmente que una parte considerable del agua retenida en forma de humedad por el árido ligero no es agua eficaz.

Cuando se amasa hormigón ligero, en función de la humedad de los áridos ligeros, durante el amasado y una vez finalizado éste se produce una migración entre el agua de amasado y el agua de los poros. De esta forma se establece un equilibrio dinámico que se traduce generalmente en descensos acusados de la docilidad del hormigón durante el período de puesta en obra (WEIG74).

Resumiendo, la cantidad de agua eficaz depende en gran manera de la cantidad de agua total que esté en forma de humedad del árido ligero. Por ello, una misma proporción de materiales secos de una dosificación conducirá a diferentes cantidades de agua de amasado en función de la humedad del árido ligero antes del amasado.

Si lo que buscamos es una trabajabilidad similar durante un período determinado tras el fin de amasado (tiempo de colocación y compactación), la cantidad de agua de amasado necesaria será mayor si amasamos con el árido ligero seco que si amasamos con el árido ligero húmedo. La cantidad de agua total no será en general la misma para garantizar la misma trabajabilidad del hormigón, para diferentes humedades del árido ligero, por lo que tendrá que determinarse experimentalmente.

Por este motivo, a lo largo de este trabajo se consideran dos condiciones iniciales de humedad del árido ligero: una humedad de partida del árido ligero baja, del 3% (condiciones estivales) y una humedad de partida del 10% (condiciones invernales).

Las dosificaciones de los hormigones HL3 y HL10 (haciendo referencia al contenido de humedad del árido ligero) coinciden en los pesos secos de cada material por metro cúbico, y se diferencian en la cantidad de agua total. La diferente humedad de los áridos condiciona que el agua de amasado necesaria para garantizar la misma docilidad transcurrido un cierto tiempo del amasado sea diferente. De esta forma la cantidad de agua total, y, por lo tanto, la densidad es diferente en ambos hormigones.

En realidad se puede hablar de dos “tipos” de hormigón ligero, HL3 y HL10, porque todo esto tiene incidencia en las propiedades mecánicas y reológicas.

El objetivo de esta investigación, como se expuso en la introducción, es obtener unas dosificaciones de los hormigones ligeros HL3 y HL10 que puedan sustituir, para las aplicaciones en que resulte rentable, la dosificación de hormigón convencional, HC, habitualmente utilizada en una empresa de grandes prefabricados, de modo que la puesta en obra y capacidades resistentes sean similares en los tres tipos de hormigones.

La nomenclatura relativa a las propiedades de los hormigones se resume en la Tabla 4.1-2, donde:



<i>MAT</i>	material genérico
<i>HC</i>	hormigón convencional de referencia
<i>HL</i>	hormigón ligero, en general
<i>HL10-1</i> , <i>HL3-1</i>	diferentes dosificaciones de hormigón ligero empleadas en esta investigación
<i>HL10-2</i> , <i>HL3-2</i>	
<i>(VN)</i>	velocidad normalizada de aplicación de la carga, en los ensayos realizados con control de carga
<i>VL</i>	velocidad de aplicación de la carga lenta, en los ensayos realizados con control de carga
<i>j</i>	edad de transferencia o ensayo (días)

A continuación se describen las propiedades de los componentes de los hormigones cuyas dosificaciones se describen a continuación.

A la hora de establecer una comparación entre las propiedades resistentes de los materiales ensayados, esta comparación no debe establecerse en términos absolutos, sino que está condicionada al ahorro en peso de cada material.

Dado que interesa establecer una comparación en términos de rendimiento de cada material, en este documento se define el coeficiente de eficacia o eficacia de la propiedad de un hormigón respecto a la misma propiedad de un hormigón de referencia, en este caso el HC, al cociente:

$$EF(prop, MAT) = \frac{\frac{prop(MAT, j)}{\rho(MAT)}}{\frac{prop(HC, j)}{\rho(HC)}}$$

donde:

<i>prop(MAT, j)</i>	propiedad de un determinado material, a la edad <i>j</i>
<i>ρ(MAT)</i>	densidad de un determinado material
<i>EF(prop, MAT)</i>	coeficiente de eficacia

La eficacia de la propiedad de un material nos indica si compensa el valor de la propiedad, teniendo en cuenta su densidad, respecto a la misma propiedad de un material patrón.

Tabla 4.1-2: Criterios de nomenclatura

Propiedad	Tipo de material	Ensayo	Dosificación hormigón	Estadística	Ciclo módulo	Percentil	Probeta	Velocidad Carga	Edad (días)
$f$ = tensión	$C$ = hormigón	$C$ = compresión	$MAT$	$k =$ característico	$A$ = primer ciclo	0.05	$cub$ = cúbica	$(VN)$	$j$
$E$ = módulo de deformación		$ct$ = tracción directa	$HC$	$m$ = promedio	$B$ = segundo ciclo	0.95	$cil$ = cilíndrica 15×30	$VL$	2
$\rho$ = peso específico		$ci$ = tracción indirecta	$HL$	$d$ = cálculo	$C$ = tercer ciclo		10x20 = cilíndrica 10×20		3
		$ct, fl$ = flexotracción	$HL101$	$est$ = estimada					28
			$HL31$						
			$HL102$						
			$HL32$						
	$P$ = pretensado	$y$ = límite elástico	—						
	$S$ = armadura pasiva	máx = carga máxima	—						



## 4.2. COMPONENTES DEL HORMIGÓN

### 4.2.1. CEMENTO

El cemento empleado a lo largo de toda esta investigación es cemento CEM I 52,5 R, procedente de Cementos Cosmos, S.A.

El cemento utilizado para los ensayos de laboratorio se almacenó en sacos de plástico de 50 a 75 kg convenientemente cerrados, en el interior del laboratorio.

Dado lo prolongado del período de ensayos, se tuvieron que utilizar diversas partidas de un mismo tipo de cemento, procedente en todos los casos de Cementos Cosmos, S.A., fábrica de Oural, Sarria (Lugo), según se refleja en la Tabla 4.2.1-1.

Tabla 4.2.1-1

Denominación	Partida
CV	"cemento viejo", partida utilizada en el Lab. de Ing. de la Const. hasta el 16 de noviembre de 1998
CN	"cemento nuevo", partida utilizada en el Lab. de Ing. de la Const. hasta el 4 de noviembre de 1999
CN1	"cemento nuevo 1", partida utilizada en el Lab. de Ing. de la Const. hasta el 5 de enero de 2000
CN2	"cemento nuevo 2", partida utilizada en el Lab. de Ing. de la Const. a partir del 5 de enero de 2000
OUTEIRO	Material procedente de los acopios de material de la fábrica de Outeiro de Rei, empleado en la fabricación de cada serie: julio de 1999 y febrero de 2000

### 4.2.2. ÁRIDOS

Por el motivo expresado anteriormente, los áridos corresponden a diferentes partidas, que denominamos según la Tabla 4.2.2-1:

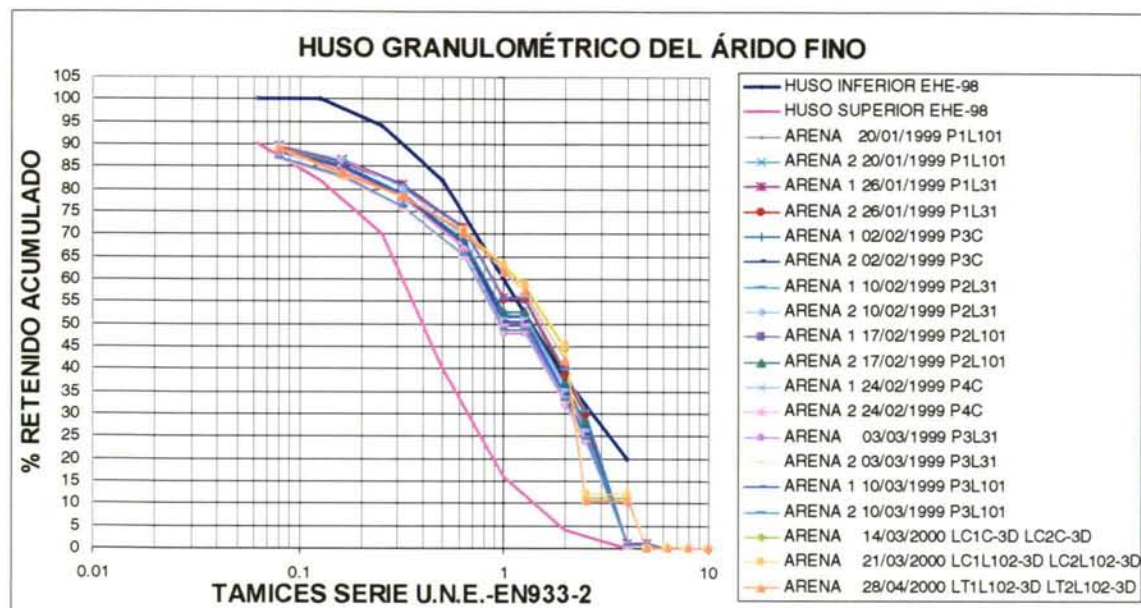
Tabla 4.2.2-1

Denominación	Partida
AV	Partida de áridos recibida en junio de 1998, utilizada en el Lab. de Ing. de la Const. hasta octubre de 1998
AN	Partida de áridos recibida en octubre de 1998, utilizada en el Lab. de Ing. de la Const. hasta enero del 2000
OUTEIRO	Áridos empleados en la fabricación de las vigas (Outeiro de Rei), procedentes de los acopios correspondientes a la fecha de fabricación de cada serie: julio de 1999 y febrero de 2000
AN2	Partida de áridos recibida en octubre de 1998, partida utilizada en el Lab. de Ing. de la Const. a partir de enero del 2000

#### 4.2.2.1. Arena

La arena empleada en todas las dosificaciones es una arena 0/5 caliza de machaqueo, procedente de Canpesa, Corporación Noroeste. En la Gráfica 4.2.2.1-1 se presentan las curvas granulométricas obtenidas a partir de muestras extraídas del material de amasado mediante cuarteo.

Se observa en la Gráfica 4.2.2.1-1 que varias de las muestras de arena de las últimas amasadas realizadas se salen del huso de la norma (EHE98), incluidas las muestras de las amasadas de las vigas fabricadas en febrero del 2000. En estas últimas se aprecia exceso de material entre 1 y 3 mm. A pesar de esto, en general hay una gran similitud entre las curvas granulométricas de las diferentes partidas y amasadas.



Gráfica 4.2.2.1-1

La nomenclatura de las muestras de la Gráfica 4.2.2.1-1 corresponde a la fecha de toma de muestra, la amasada a la que pertenecen, y si hay más de una muestra de la misma fecha y amasada, un número identificativo previo.

Los resultados de densidad y capacidad de absorción de la arena<sup>4.1</sup> se resumen en la Tabla 4.2.2.1-1:

Tabla 4.2.2.1-1

Densidad real	Absorción	Densidad real saturada superficie seca
kN/m <sup>3</sup>	%	kN/m <sup>3</sup>
26.3	0.6	26.4

#### 4.2.2.2. Gravilla

La gravilla 6/12 empleada en las amasadas de HC es granítica, procedente de O Carqueixo, Lugo. Las densidades obtenidas de las muestras analizadas, procedentes de diversas amasadas se resumen en la Tabla 4.2.2.2-1.

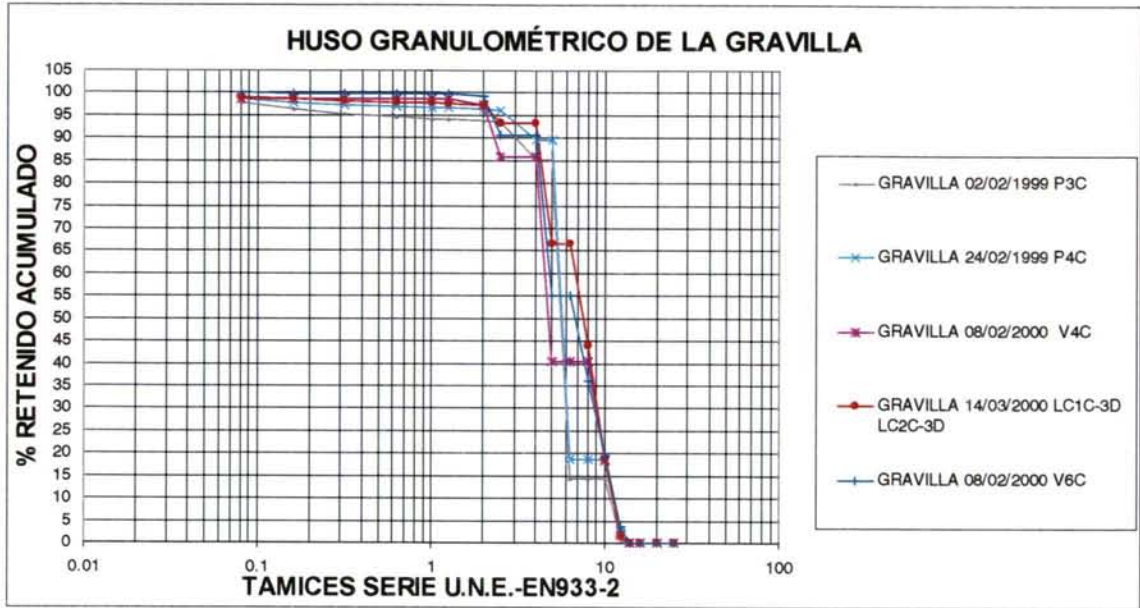
Tabla 4.2.2.2-1

Densidad real	Absorción	Densidad real saturada superficie seca
kN/m <sup>3</sup>	%	kN/m <sup>3</sup>
25.5	0.4	25.7

En la Gráfica 4.2.2.2-1 se presentan las curvas granulométricas obtenidas de muestras de las amasadas realizadas. En esta gráfica se aprecia la presencia de material entre 2 y 5 mm, en la gravilla.

<sup>4.1</sup> La determinación de la densidad y absorción de los áridos se ha efectuado siguiendo la norma UNE 83134:1990.





Gráfica 4.2.2.2-1

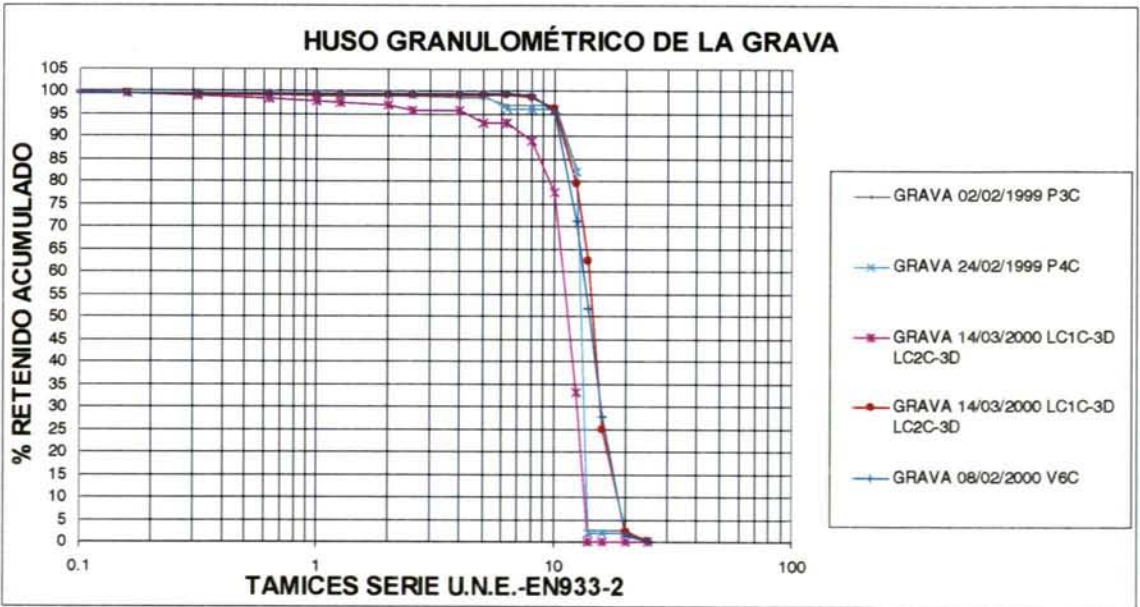
4.2.2.3. Grava

Grava granítica 12/18 de machaqueo, de la misma procedencia y propiedades que la gravilla. Las densidades obtenidas se presentan a continuación en la Tabla 4.2.2.3-1:

Tabla 4.2.2.3-1

Densidad real	Absorción	Densidad real saturada superficie seca
kN/m <sup>3</sup>	%	kN/m <sup>3</sup>
25.6	0.33	25.7

En la Gráfica 4.2.2.3-1 se presentan las curvas granulométricas obtenidas de las muestras extraídas del material de amasada:



Gráfica 4.2.2.3-1

#### 4.2.2.4. Árido ligero: arcilla expandida

La denominación de la arcilla expandida empleada es ARLITA<sup>®</sup>, de la clase F-7 (ARLI96). Las características facilitadas por el suministrador se reflejan en la Tabla 4.2.2.4-1 (ARLI96). Este árido es el recomendado por el fabricante para la fabricación de elementos de hormigón ligero estructural y pretensado.

Tabla 4.2.2.4-1

Característica	Densidad aparente en seco	Densidad real	Absorción de agua a las 24 horas	Resistencia a compresión	Conductividad térmica	Coefficiente de dilatación térmica
Unidades	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	%	MPa	kcal/h·m·°C	mm/m °C
Rango	6.9-7.8	12.25-13.23	8.5	1.8-2.0	0.14	0.0035-0.0060

Los resultados de los ensayos realizados sobre muestras de arcilla expandida, para la determinación de la densidad y absorción se detallan en la Tabla 4.2.2.4-2:

Tabla 4.2.2.4-2

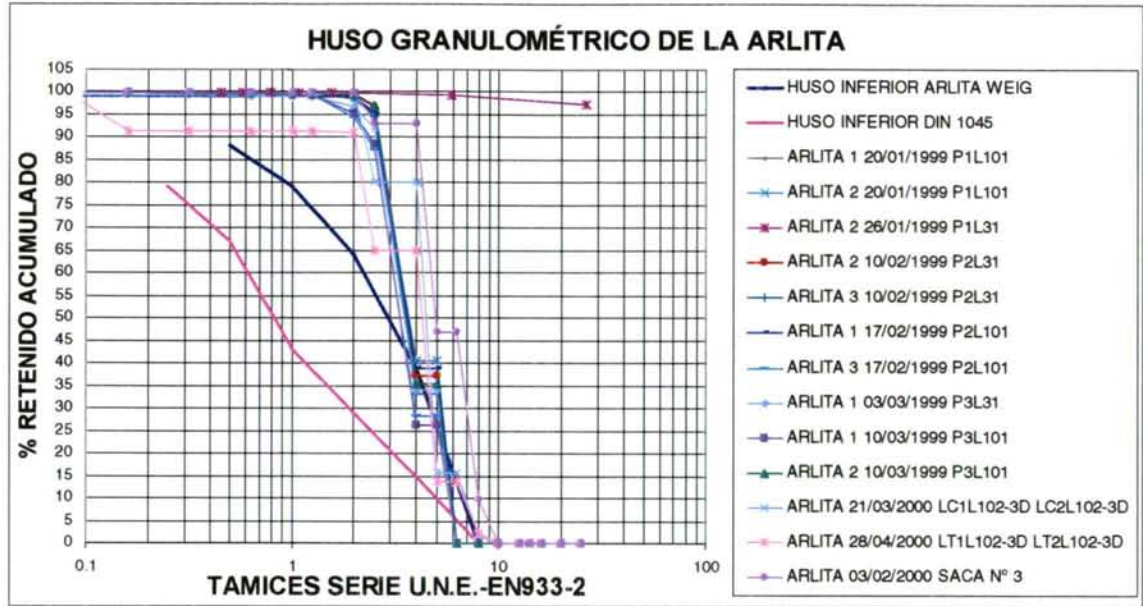
Muestra	Densidad real	Absorción	Densidad real saturada superficie seca
	kN/m <sup>3</sup>	%	kN/m <sup>3</sup>
1	12.15	12.28	13.64
2	12.63	11.44	14.08
3	12.52	11.26	13.93
4	12.45	11.86	13.93
Media	12.44	11.71	13.89
Desviación estándar	0.21	0.46	0.18

Se efectuaron granulometrías de control del producto, extrayendo muestras representativas mediante cuarteo del material empleado para las amasadas. Los resultados se reflejan en la Gráfica 4.2.2.4-1, a partir de muestras de las amasadas realizadas.

La nomenclatura de las muestras de la Gráfica 4.2.2.4-1 corresponde a la fecha de toma de muestra, la amasada a la que pertenecen, y si hay más de una muestra de la misma fecha y amasada, un número identificativo previo.

Se observa que el material ensayado es arcilla expandida 2/8, aunque en algunos casos se aprecia descenso de tamaño máximo de árido a 6 mm. Este producto, paradójicamente presenta una dispersión apreciable entre diferentes muestras, tratándose de un producto industrial. La dispersión es superior a la que presentan los áridos convencionales.





Gráfica 4.2.2.4-1

En la Tabla 4.2.2.4-3 se presenta el registro de las humedades de muestras procedentes del acopio a la intemperie, proporcionado por el fabricante, correspondientes a 1997.

Tabla 4.2.2.4-3

Fecha	Densidad real seca	Densidad aparente seca	Densidad aparente húmeda	Humedad
	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	%
30/10/97	13.6	7.4	8.2	10.2
29/10/97	13.6	7.5	8.2	7.7
28/10/97	12.8	7.3	8.1	7.2
16/10/97	13.7	7.8	7.9	1.0
29/09/97	12.9	7.5	7.9	6.0
25/09/97	13.6	7.8	8.4	4.2
24/09/97	13.6	7.8	7.8	0.1
22/09/97	14.0	7.5	7.0	0.4
09/09/97	13.0	7.1	7.1	0.1
29/07/97	13.6	7.3	7.5	4.0
23/07/97	13.2	7.0	7.4	6.0
14/07/97	13.6	7.3	7.4	2.2
09/07/97	13.2	7.3	7.4	0.6
07/07/97	13.6	7.5	7.6	0.5
28/06/97	12.8	7.3	7.4	0.5
24/06/97	13.2	7.3	7.4	0.5
19/06/97	12.8	7.4	7.5	0.5
05/06/97	14.4	7.8	8.6	12.0
24/04/97	13.6	7.5	8.0	8.1
18/04/97	14.0	7.5	7.8	5.7
21/03/97	12.8	7.4	7.6	5.0
14/03/97	14.4	7.8	8.1	1.0
06/03/97	13.7	7.6	7.8	2.0
10/02/97	13.7	7.1	8.8	19.8
03/02/97	13.7	7.2	8.8	19.8
30/01/97	13.7	7.4	9.4	22.5
27/01/97	13.7	7.2	7.8	19.5
Desviación estándar	0.4	0.3	1.6	6.9
Promedio	13.5	7.4	7.6	6.0

Se aprecia en la Tabla 4.2.2.4-2 que la densidad real seca es de  $13.5 \pm 0.4 \text{ kN/m}^3$ , y la densidad seca de conjunto de  $7.4 \pm 0.3 \text{ kN/m}^3$ . La densidad seca es superior a la obtenida a partir de las muestras de estos ensayos. Como se puede observar la fluctuación de la humedad en el período de medida es considerable, adopta valores entre el 1 y el 23%.

Para obtener la humedad deseada, bien del 3% o del 10%, para la fabricación de los hormigones ligeros HL3 o HL10 en laboratorio, se siguió en todos los casos el siguiente procedimiento:

- Obtención de una muestra representativa mediante cuarteo, en el caso de amasadas de laboratorio. En fábrica se realizó un muestreo de las sacas de un metro cúbico.
- Evaluación de la humedad de la arcilla expandida, mediante secado en estufa a  $105^\circ\text{C}$  durante al menos 24 horas.
- Determinación de la cantidad de agua a añadir, para la consecución de la humedad deseada.
- Homogeneización del material, para repartir por igual el agua añadida.
- Período de espera antes de hormigonar, de al menos 24 horas, para posibilitar la absorción del agua por parte del árido.

Para las amasadas efectuadas en fábrica, el proceso que se siguió fue el mismo, salvo que la adición de agua para conseguir la humedad fijada, y la homogeneización se efectuaron en un camión hormigonera de  $6 \text{ m}^3$  de capacidad, a velocidad baja, dos o tres días antes del hormigonado. La arcilla expandida se almacenó en los silos hasta el momento del amasado.

Al árido ligero empleado en esta investigación le denominaremos en adelante arlita.

### 4.2.3. ADITIVOS EMPLEADOS

En la fabricación de los hormigones se han empleado los agentes reductores de agua de alta capacidad, con efecto superfluidificante (UNE 83-282-90), de la marca Bettor MBT que se describen en la Tabla 4.2.3-1:

Tabla 4.2.3-1

Aditivo	Unidad	Melcret 222	Glenium 52
Densidad	$\text{kN/m}^3$	$10.29 \pm 0.20$	$10.29 \pm 0.20$
Dosis recomendadas, porcentaje de peso de cemento	%	0.7-1.4	0.7-1.4
Modo de adición recomendada		Con o después de agua de amasado	Con o después de agua de amasado

Las partidas empleadas en la fabricación de los hormigones se detallan en la Tabla 4.2.3-2:



Tabla 4.2.3-2

Aditivo	Partida	Fecha
MELCRET 222	MCJUN98	Junio 1998
	MCDIC99	29 Diciembre 1999
	MCOUT99	Outeiro 1999
	MCOUT00	Outeiro 2000
GLENIUM 52	GLNOV99	29 Noviembre 1999
	GLENE00	5 Enero 2000
	GLOUT00	Outeiro 2000

### 4.3. HORMIGONES

#### 4.3.1. OBTENCIÓN DE LAS DOSIFICACIONES DE PARTIDA: HL3-1 Y HL10-1

Los requisitos que se fijaron para determinar las dosificaciones iniciales fueron inicialmente:

- Valores de las resistencias a compresión determinadas mediante ensayos de compresión realizados a velocidad normalizada, a la edad de transferencia de pretensado prevista (fijada inicialmente en 48 horas, por ser la adoptada en fábrica) similares a las obtenidas en el hormigón convencional, y del orden de 45 MPa como mínimo en probeta cilíndrica.
- Similar trabajabilidad de los hormigones ligeros HL3 y HL10, relativa al HC. El tiempo estimado para la colocación y compactación de cada amasada en la empresa de prefabricados, dada la productividad de la central de amasado, la proximidad de la misma y el proceso de colocación y compactación no supera los 15 minutos. La comparación de la docilidad de los hormigones se realiza transcurrido este tiempo del final de amasado. Por ello se exige a los hormigones ligeros un cono de Abrams similar al del hormigón convencional, medido tras 15 minutos del final de amasado, del orden de  $7.5 \pm 2.5$  cm.
- Ausencia de segregación por flotación del árido ligero. Este hecho es frecuente en el hormigón ligero debido a la gran diferencia de densidad entre el árido ligero y el mortero fresco (WEIG74). El análisis de las probetas tras el ensayo a tracción indirecta permite evaluar la mayor o menor sensibilidad de la mezcla a la segregación, así como el grado de compactación obtenido.
- Durante la etapa inicial de ajuste de dosificaciones se realizaron una serie de ensayos a compresión a una velocidad mucho menor que la normalizada, del orden de 1/7 de la misma (véase la Tabla 4.3.1-1). Se observó que para hormigones ligeros se producía un descenso considerable de la resistencia a compresión, respecto a la que experimenta el HC. Esto puso de manifiesto una mayor sensibilidad de estos hormigones frente a efectos diferidos: cansancio y fluencia. La caída de resistencias a velocidad lenta en los hormigones ligeros de los tanteos de búsqueda de dosificaciones iniciales, era del orden del triple de la que se obtenía para hormigón convencional. Dada la gran importancia de los efectos diferidos en las pérdidas totales de pretensado, se fijó como criterio adicional para la obtención de las

dosificaciones de hormigón ligero que la caída de resistencias fuese mínima. La caída en la resistencia de los hormigones ligeros analizados en este estudio para probetas de la misma edad, al disminuir la velocidad de aplicación de la carga a compresión, es del mismo orden de magnitud que la que se produce en hormigones convencionales.

Tabla 4.3.1-1

Ensayo probeta cúbica	Denominación	Velocidad (kN/s)
Compresión rápida (kN/s)	VN	4.900
Compresión lenta (kN/s)	VL	0.663
	VN/VL	7.32

- El objetivo fundamental de esta búsqueda de dosificaciones era, por supuesto, conseguir la mínima densidad de estos hormigones respecto a la densidad del hormigón convencional, siempre y cuando se cumpliesen los requisitos anteriores.

El proceso de búsqueda de las amasadas realizadas fue laborioso. Dado que el tamaño máximo de la arlita era de 8 mm, se decidió realizar el proceso de ajuste inicial mediante amasadas de probetas de 4×4×16 cm.

De esta forma, para cada amasada se disponía de resultados de la resistencia a flexotracción y de compresión. A la hora de estimar la docilidad de las mezclas preparadas se evaluó la docilidad de las mezclas mediante la compactadora de mortero de la norma EN 196-1, mediante un ensayo desarrollado en Cementos Cosmos, Oural<sup>4.2</sup>. A este ensayo le denominaremos en este documento ensayo de golpes de Oural, o simplemente ensayo de golpes. En esta investigación se optó por realizar el ensayo de golpes a los quince minutos del final de amasado, para simular el tiempo real máximo empleado en el transporte desde la planta y colocación en fábrica. En este ensayo se llena la mitad del molde de probetas de 4×4×16, según las Fotografías 4.3.1-1 y 4.3.1-2.



Fotografía 4.3.1-1



Fotografía 4.3.1-2

<sup>4.2</sup> Ensayo desarrollado por A. Martínez y M. Fernández, cuyo desarrollo se plantea en la referencia MART98.



Tras retirar las piezas de nylon se procede a compactar la masa, de la forma habitual. Aprovechando el proceso de compactación se mide el número de golpes necesario para que la mezcla de los tres puestos del molde alcance el extremo opuesto. Cuanto mayor sea el número de golpes, mayor es la plasticidad de la mezcla, y cuanto menor mayor es la fluidez. Apoyándonos en la experiencia del Laboratorio de Cementos Cosmos, se establecieron inicialmente unos límites superior e inferior que definen el intervalo de docilidad óptimo, entre 20 y 35 golpes respectivamente, necesarios para conseguir la consistencia blanda deseada. El número de golpes se obtiene promediando el número de golpes necesario para cada uno de los tres puestos del molde.

A pesar de que el tamaño máximo de la grava del HC es de 18 mm, se realizó el ensayo de los golpes, y se confeccionaron y ensayaron las probetas prismáticas de 4×4×16 cm. La dispersión del número de golpes fue para el HC del mismo orden que para el resto de los materiales (véase la Tabla 4.3.4.3-1).

Las dosificaciones de los hormigones ligeros que, con una densidad mínima cumplieron estos requisitos son las siguientes:

**HL3-1:** dosificación de hormigón ligero en peso, arcilla expandida con humedad del 3%, cono de Abrams a los 15 minutos de 6 cm, resistencia a compresión a 48 horas a VN en probeta cilíndrica mayor que 45 MPa (véase la Tabla 4.3.1-2).

Tabla 4.3.1-2

Dosif.	Agua	Arcilla expandida seca	Arena seca	Cemento I-52,5R	Humedad arcilla expandida	Melcret 222
	g	g	g	g	%	g
HL3-1	205	550	610	500	3	6

**HL10-1:** dosificación de hormigón ligero en peso, arcilla expandida con humedad del 10%, cono de Abrams a los 15 minutos de 6 cm, resistencia a compresión a 48 horas a VN en probeta cilíndrica mayor que 45 MPa (véase la Tabla 4.3.1-3).

Tabla 4.3.1-3

Dosif.	Agua	Arcilla expandida seca	Arena seca	Cemento I-52,5R	Humedad arcilla expandida	Melcret 222
	g	g	g	g	%	g
HL10-1	190	550	610	500	10	6

A continuación, en la Tabla 4.3.1-4, se presentan los resultados de las amasadas iniciales (partidas iniciales de material AV+CV). En esta tabla se aprecia la escasa variación de resistencia a compresión entre los dos y los tres días posteriores al amasado, para los hormigones ligeros HL3-1 y HL10-1. Sin embargo, el HC experimenta un crecimiento del 10% de la resistencia a compresión. Las variaciones de las resistencias a tracción indirecta de dos a tres días son superiores a las que experimenta la resistencia a compresión (mejoras del 11% para ambos hormigones ligeros). Se observa el elevado coeficiente de eficacia, superior a 1, excepto en el módulo de deformación.

Tabla 4.3.1-4

Propiedad	Unidades				Coeficiente de eficacia		
		HC	HL3	HL10	HC	HL3	HL10
cono de Abrams	cm	8	6	8	1.0	1.0	1.3
consistencia	golpes ensayo Oural	—	40	32			
$\rho_{cub}$	kN/m <sup>3</sup>	24	18	19	1.0	1.0	1.0
$\rho$	kN/m <sup>3</sup>	24	18	18	1.0	1.0	1.0
$f_{cm,2}$	MPa	44	54	52	1.0	1.6	1.5
$f_{cm,cub,2}$	MPa	55	61	58	1.0	1.5	1.4
$f_{cim,2}$	MPa	3.5	3.4	3.2	1.0	1.3	1.2
$E_{cmB,2}$	MPa	29092	21514	19841	1.0	1.0	0.9
$f_{cm,3}$	MPa	47	56	52	1.0	1.5	1.4
$f_{cm,cub,3}$	MPa	58	65	61	1.0	1.5	1.4
$f_{cm,28}$	MPa	59	63	59	1.0	1.4	1.3
$f_{cm,cub,28}$	MPa	71	68	74	1.0	1.3	1.3
$f_{cim,28}$	MPa	4.2	3.8	3.6	1.0	1.2	1.1
$E_{cmB,28}$	MPa	32617	23800	22877	1.0	1.0	0.9

### 4.3.2. OBTENCIÓN DE LAS DOSIFICACIONES MODIFICADAS HL3-2 Y HL10-2

Como se verá en el Capítulo 8, se decidió modificar las dosificaciones de hormigón ligero, debido a la tendencia probada de los hormigones ligeros HL3-1 y HL10-1 a presentar fisuración por hendimiento diferida tras la transferencia de pretensado.

Las dosificaciones iniciales de hormigón ligero, HL3-1 y HL10-1 se determinaron inicialmente buscando hormigones de resistencia a compresión (determinada mediante ensayo normalizado) similar a la del hormigón convencional. Sin embargo, las resistencias a tracción directa eran sustancialmente inferiores en el hormigón ligero. La insuficiente resistencia a tracción diferida es, a nuestro juicio, la causa de la fisuración longitudinal observada.

Por ello se abordó la búsqueda de nuevas dosificaciones de hormigón ligero con mejores prestaciones. Para ello se hizo necesario analizar las propiedades instantáneas y diferidas de las dosificaciones de hormigón ligero y de hormigón convencional, para fijar parámetros descriptores que permitan evaluar la capacidad de estos hormigones ligeros para ser pretensados.

Los parámetros descriptores son:

- Resistencia a tracción del hormigón a la edad de transferencia (48 horas).
- Resistencia a tracción del hormigón durante el servicio (que será como mínimo el valor correspondiente a 28 días).



- A estos factores, puesto que el pretensado es una acción de carácter permanente, habrá que añadirle otra variable: el coeficiente de cansancio a tracción, es decir, el factor que, aplicado a la resistencia a tracción de los ensayos normalizados, nos proporciona la tensión que puede soportar el hormigón de forma permanente sin que se produzca rotura diferida. Se tomaron como referencia los valores encontrados en la bibliografía (FOUR85a, FOUR85b).

El criterio adicional que se fijó para las nuevas dosificaciones de hormigón ligero es que la resistencia a tracción diferida estimada con los coeficientes de cansancio a tracción de la bibliografía (FOUR85a, FOUR85b) de los nuevos hormigones debía igualar a la del hormigón de referencia.

Para ello, para mejorar las resistencias a tracción, se aumentó la cantidad de arena y se disminuyó la cantidad de arcilla expandida, compensando volúmenes (ACIC97, ACIC92a). Además, para reducir la relación agua-cemento, se reemplazó el agente reductor de agua por uno más potente, el Glenium 52. De esta forma las dosificaciones obtenidas, que con la mínima densidad cumplían todos los requisitos impuestos fueron:

**HL3-2:** dosificación modificada de hormigón ligero en peso, arcilla expandida con humedad del 3%, trabajabilidad equivalente a la del HC a los 15 minutos del final de amasado (véase la Tabla 4.3.2-1).

Tabla 4.3.2-1

Dosif.	Agua	Arcilla expandida. Peso seco	Arena	Cemento I-52,5R	Súper Glenium 52	Humedad arcilla expandida
	g	g	g	g	g	%
HL3-2	185	402	877	500	6	3

**HL10-2:** dosificación modificada de hormigón ligero en peso, arcilla expandida con humedad del 10%, trabajabilidad equivalente a la del HC a los 15 minutos del final de amasado (véase la Tabla 4.3.2-2).

Tabla 4.3.2-2

Dosif.	Agua	Arcilla expandida. Peso seco	Arena	Cemento I-52,5R	Súper Glenium 52	Humedad arcilla expandida
	g	g	g	g	g	%
HL10-2	180	402	877	500	6	10

Las dosificaciones obtenidas presentan las siguientes características:

- Una elevada densidad, para tratarse de un hormigón ligero, de hecho en teoría este hormigón está cubierto por la normativa EHE, donde se define hormigón ligero aquel de densidad comprendida entre 1.2 y 2.0 T/m<sup>3</sup> (EHE98, Artículo 1º), sin que se especifique si la densidad de referencia es seca o con una cierta humedad.
- El comportamiento del hormigón fabricado con el Glenium 52 es sustancialmente diferente al que presentan los hormigones con los agentes reductores de agua habituales. Debido a la elevada viscosidad y tensión superficial de estos hormigones en fresco, el cono de Abrams ha demostrado poca eficacia para medir la docilidad:

un descenso del cono de Abrams elevado no garantiza la adecuada trabajabilidad. Por ello, para determinar el tiempo de amasado mínimo y valorar la consistencia durante el amasado se optó por colocar un amperímetro en la amasadora de laboratorio. El final de amasado se fijó en el momento en que se estabilizase el consumo de la amasadora. Este mismo tipo de control se empleó en la fabricación de la segunda serie de vigas, en fábrica.

A pesar de que la humedad de la arcilla expandida para el HL10-2 se fijó en el 10%, las muestras de arcilla expandida de las amasadas de la fabricación de las vigas de HL10-2 presentaron una humedad superior, probablemente debido a la heterogeneidad de humedad en las sacas, lo que motivó que la humedad determinada mediante muestreo fuese distinta a la humedad media. Por ello, se adoptó la decisión de que en las amasadas posteriores en el laboratorio, destinadas a los ensayos de pórtico, la arcilla expandida se prepararía con la humedad media de las muestras obtenidas en fábrica, humedad del 13.5%, para poder correlacionar posteriormente los diferentes ensayos.

Realmente el exceso de humedad de la arcilla expandida en el HL10-2 produce un aumento de la relación agua-cemento que es desfavorable respecto a segregación y resistencias. De hecho la resistencia a tracción a la edad de transferencia disminuyó un 10% respecto a la de la dosificación nominal. Una humedad del 13.5% es superior a la capacidad de absorción de la arcilla expandida en 24 horas, lo que implica la posible existencia de agua en forma de meniscos entre los granos de arcilla expandida, y no absorbida en su totalidad. A pesar de esto, se mantuvo la denominación de HL10-2.

En todos los ensayos descritos en este documento, la humedad de la arcilla del HL10-2 fue del 13.5%, para poder comparar los resultados de los diferentes ensayos. A pesar de esto se mantuvo la denominación.

### **4.3.3. PROCEDIMIENTO DE AMASADO EN LABORATORIO**

Los volúmenes de las amasadas confeccionadas en el Laboratorio de la ETSICCP de La Coruña variaron entre los 35 y los 45 litros, con el fin de garantizar una energía de amasado similar para las distintas amasadas, manteniendo constante la duración de cada una de las fases contempladas en el procedimiento de amasado (Tabla 4.3.3-2).

En las Fotografías 4.3.3-1 a 4.3.3-4 se aprecia la amasadora de eje vertical del laboratorio, y diferentes momentos del proceso de llenado y compactación de probetas.

Con las amasadas realizadas se confeccionaron probetas cilíndricas  $\phi 15 \times 30$ , probetas de tipo cúbico de  $10 \times 10 \times 10$  cm, y en el caso de los hormigones ligeros tres probetas prismáticas de dimensiones  $4 \times 4 \times 16$  cm por cada amasada.

En las amasadas de caracterización del material, el curado de las mismas se realizó en la cámara húmeda, procediéndose al desmoldado de las probetas a las 24 horas de su fabricación, según lo establecido por la normativa.

En el caso de las probetas de  $4 \times 4 \times 16$  cm el curado se realizó en cámara húmeda, sumergidas en agua. El transporte de las probetas al laboratorio de Cementos Cosmos, en Oural, donde se ensayaron, se realizó manteniendo las probetas en las condiciones de inmersión en agua a fin de no alterar su curado.





Fotografía 4.3.3-1



Fotografía 4.3.3-2



Fotografía 4.3.3-3



Fotografía 4.3.3-4

El refrentado de las probetas cilíndricas se realizó con el mortero de azufre recomendado en la normativa 83-303-84, con la composición de la Tabla 4.3.3-1:

Tabla 4.3.3-1

Material	% en peso
Azufre en polvo	62
Arena silícea (fracción entre 0.32 y 0.16 UNE 7-050)	36
Humo de sílice procedente de Sabón	2

Tabla 4.3.3-2

Operación	Hormigón	Tiempo de amasado desde fin operación
Vertido de la arena	todos	+30s
Cemento	todos	+60s
Vertido de áridos gruesos	todos	+60s
Vertido de agua	todos	+60s
Vertido de aditivo reductor de agua	HC+HL10-1+HL3-1	+60s, controlando amperímetro
Vertido de aditivo reductor de agua	HL10-2+HL3-2	Hasta la estabilización del amperímetro para fin de amasado

A los 15 minutos del fin de amasado, se procedía a realizar el ensayo de cono de Abrams y el ensayo de golpes en la compactadora de mortero, en el caso del hormigón ligero (MART98).

Inmediatamente después se procedía a llenar las probetas y a compactarlas con vibrador de aguja de 25 mm de diámetro, según la Tabla 4.3.3-3:

Tabla 4.3.3-3

Tipo de probeta	Dimensiones (cm)	Nº tongadas	Tiempo vibrado Amasadas Melcret 222 / tongada (s)	Tiempo vibrado Amasadas Glenium 52 / tongada (s)
Cúbica	10×10×10	1	5	2
Cilíndrica	10×20	2	4	2
Cilíndrica	15×30	3	8	2

Finalmente se llenaban las probetas de tracción directa, las probetas de 4×4×16 en el caso del hormigón ligero y las probetas de retracción.

El curado de las probetas se realizaba colocando telas húmedas recubiertas por una lámina impermeable, a las 4 horas del final de amasado. El curado se mantenía hasta las 20-24 horas del final de amasado, momento en que se desmoldaban y pesaban las probetas.

Las condiciones de conservación posterior fueron las mismas para todas las probetas de la amasada, hasta la edad de ensayo, dependiendo del tipo de ensayo.

#### 4.3.4. RESUMEN DE LAS AMASADAS REALIZADAS

##### 4.3.4.1. Métodos de ensayo

La determinación de las resistencias a compresión, a tracción indirecta y a flexotracción en probetas de 4×4×16 se realizó siguiendo las correspondientes normas UNE.

La determinación de la resistencia a tracción directa se efectuó con una balanza de Michaelis, de Tonidustrie, propiedad de Cementos Cosmos, a partir de probetas de sección cuadrada de 25×25 mm. A pesar de que el tamaño máximo de la grava es de 18 mm, se confeccionaron probetas de tracción directa y prismáticas de este material.

La determinación del módulo de deformación del hormigón en compresión, se ha realizado de dos formas:

1. Según un procedimiento basado en la norma ASTM C 469, mediante un bastidor de Ibertest. La resistencia a compresión en probeta cilíndrica se determina a partir del resultado de rotura de probetas cúbicas de la misma amasada, y del factor F (relación entre la resistencia a compresión en probeta cilíndrica, y en probeta cúbica de probetas del mismo material de amasadas anteriores, ensayadas a la misma edad de ensayo). La longitud base de medida es de 150 mm. Se aplican dos ciclos de carga, se determina el módulo A, se aplican posteriormente otros dos ciclos de carga y se determina el módulo B. Finalmente se ensaya la probeta hasta rotura, y se comprueba que la resistencia estimada no difiera en más de un 20% de la resistencia real obtenida.



2. En algunos casos, junto con este método anterior, se estimaba el módulo de deformación a partir de los diagramas carga unitaria-deformación, determinados adhiriendo dos bandas extensométricas longitudinales y transversales diametralmente opuestas en la probeta cilíndrica a ensayar, centradas respecto a la altura de la probeta. Las bandas empleadas tenían una longitud de 60 mm, por lo que los resultados obtenidos no necesariamente coinciden con los del ensayo ASTM (en este último caso la longitud entre los puntos de medida es de 150 mm aproximadamente).

Junto con el valor del módulo de deformación secante en carga y en descarga, se dispone de diagramas de tensión-deformación de los materiales HL10-1, HC y HL10-2. Dado que, en este caso, el control del ensayo es por carga, no se dispone del valor de deformación última en rotura, ni de la rama post-pico del diagrama tensión-deformación.

#### 4.3.4.2. Resistencias a compresión a velocidad normalizada y a velocidad lenta

Durante las etapas de búsqueda de las dosificaciones, se realizaron ensayos de probetas a compresión, a velocidad normalizada y a velocidad siete veces menor. Los resultados se resumen en la Tabla 4.3.4.2-1.

Tabla 4.3.4.2-1

Material		Agua	Golpes	Cono	$f_{cm,2,VN}$	$f_{cm,2,VL}$	VAR
				cm	MPa	MPa	%
HC	AV+CV	184		6	54.82	52.35	-4.5
HL3-1	AV+CV	205	40	6	59.69	55.51	-7.51
HL10-0	AV+CV	195	32	6.5	54.13	50.61	-6.50
HC	AN2+CN2	184		5.5	61.50	58.19	-5.4
HL10-2	AN2+CN2	180	18		69.85	63.19	-9.5
HL3-2	AN2+CN2	185	17		72.66	64.74	-10.9

donde

$$VAR = \frac{f_{cm,2,VN} - f_{cm,2,VL}}{f_{cm,2,VN}} \cdot 100$$

Posteriormente se constató que, reduciendo la cantidad de agua añadida de 195 a 190 g se lograba una consistencia adecuada, por lo que se adoptó la nueva dosificación, de hormigón HL10-1.

De estos resultados se dedujo que existe una mayor sensibilidad a los fenómenos de flexión sostenidos en el tiempo por parte de los hormigones ligeros, que los que experimentarían hormigones convencionales de las mismas prestaciones.

También se ha constatado una menor resistencia a compresión en probetas de HL10-1 que en probetas de HL3-1, lo cual puede estar motivado por lo expuesto en el punto anterior, además de la mayor relación agua efectiva/cemento que se produce para el primer hormigón. Paradójicamente, la variación de resistencias en función de la velocidad de carga es superior en los hormigones HL3-2 y HL10-2, que presentan menor relación agua de amasado-cemento. Estos resultados corresponden a las

amasadas iniciales en laboratorio, por lo que la humedad de la arcilla expandida es del 10% para el HL10-2. Esto puede estar motivado por las diferentes partidas de los componentes. En general, las amasadas con materiales de la primera partida proporcionaron resistencias superiores a las de las demás partidas.

La correlación existente entre el cono de Abrams y el ensayo de los golpes, efectuado después de transcurridos quince minutos desde el final del amasado, ha demostrado ser lo suficientemente precisa en el caso de los hormigones ligeros. El ensayo de golpes (MART98) es más sensible que el cono de Abrams<sup>4.3</sup>, permite detectar diferencias de comportamiento entre hormigones con la misma dosificación básica y pequeñas diferencias en la cantidad de agua de amasado (véase el Apartado 4.2). Por ello se planteó la realización del ensayo de golpes en las amasadas de hormigones ligeros de las etapas siguientes, para tener un dato adicional de la docilidad de los hormigones.

#### 4.3.4.3. Resumen de las amasadas realizadas

En la Tabla 4.3.4.3-1 se proporciona un resumen de las propiedades determinadas en las amasadas realizadas, y un resumen estadístico por cada material. Debido a que las amasadas no son muy numerosas por cada material (generalmente menos de veinte), no tiene sentido la obtención de los valores característicos. Por ello, siguiendo lo establecido por la EHE, para cada propiedad y cada material se proporcionan los valores máximos y mínimos de todas las amasadas, la desviación estándar, y el valor promedio.

Para las amasadas de HL3-1 y HL10-1 se presentan resultados a dos días debido a que ese es el valor de la edad de transferencia y ensayo de adherencia en probeta. Las amasadas de HL10-2 presentan, sin embargo, principalmente resultados a 3 días, dado que la edad de transferencia y ensayo se fijó en ese valor. Las amasadas de HC presentan valores a ambas edades, por tratarse del material de referencia de todos los ensayos.

En la Tabla 4.3.4.3-2 se resumen los valores de resistencias a compresión y a tracción directa mínimos de cada material.

Tabla 4.3.4.3-2

Material	$f_{c\text{ mín},2}$	$f_{c\text{ mín},3}$	$f_{ct\text{ mín},2}$	$f_{ct\text{ mín},3}$	Consistencia
	MPa	MPa	MPa	MPa	
HC	46	47	2.9	3.0	Blanda
HL10-1	42		2.1		Blanda
HL3-1	47		2.0		Blanda
HL10-2		57	2.6	3.1	Fluida

<sup>4.3</sup> Siempre que el tamaño máximo de árido permita su empleo, como es el caso de los HL.



Tabla 4.3.4.3-1: RESULTADOS DE LAS AMASADAS REALIZADAS

DENOMINACIÓN AMASADA	FECHA AMASADO	MATERIAL	PARTIDAS COMPONENTES	ADITIVO PARTIDAS	CONVO	GOLPES	DENSIDAD PROB. NO CIL. kNm3	DENSIDAD SECA PROB. NO CIL. kNm3	DENSIDAD PROB. 15x30 kNm3	DENS. SECA PROB. 15x30	RES. P. CUBICA 2D MPa	RES. COMP. 15x30 2D MPa	RES. TRAC. IND. 2D MPa	MO. DEF. A 2D MPa	MOD. DEF. B 2D MPa	RES. P. CUBICA 3D MPa	RES. COMP. 15x30 3D MPa	RES. TRAC. IND. 3D MPa	MO. DEF. A 3D MPa	MOD. DEF. B 3D MPa	RES. P. CUBICA 28D MPa	RES. COMP. 15x30 28D MPa	RES. TRAC. IND. 28D MPa	MO. DEF. A 28D MPa	MOD. DEF. B 28D MPa	DENSIDAD PROB. 4X4X16 kNm3	RES. TRAC. DIR. 2D MPa	RES. TRAC. DIR. 3D MPa	RES. FLEXOT. 2D MPa	RES. COMP. 4X4 2D MPa	RES. COMP. 4X4 3D MPa	EDAD 28D dias	DENSIDAD 28D kNm3	RES. TRAC. DIR. 28D MPa	RES. FLEXOT. 28D MPa	RES. COMP. 4X4 28D MPa					
6C	22/09/98	HC	CV+AN	MCJUN98	8									24551	26681												23,9	3,2		7,8	64										
LT1C-2D	14/10/98	HC	CV+AN	MCJUN98	12	28	23,76	22,58	22,34	21,23	61	46		26581	28845												24,1	2,9		7,8	67										
LT2C-2D	14/10/98	HC	CV+AN	MCJUN98	10	26	23,67	22,50	22,36	21,25	62	49		29370	30286																				28	24,3		8,1	90		
LC1C-2D	28/10/98	HC	CV+AN	MCJUN98	11	31	23,53	22,37	22,40	21,29	64	52		28877	30256																				28	24,4		8,3	92		
LC2C-2D	28/10/98	HC	CV+AN	MCJUN98	10	33	23,68	22,50	22,33	21,22	62	49		27013	28795																										
6C	25/11/98	HC	CN+AN	MCJUN98	18	29	23,52	22,36	22,33	21,22	70	55		28472	30856												23,7	3,5		7,6	71										
P3C	02/02/99	HC	CN+AN	MCJUN98	11	25	23,54	22,37	22,28	21,18	66	52		28370	31153																										
P4C	24/02/99	HC	CN+AN	MCJUN98	12	20	23,55	22,38	22,32	21,21	67	53		28964	31103												18,0	3,6			68					30	24,4		9,6	90	
7C	09/11/99	HC	CN1+AN	MCJUN98	14	24	23,83	22,65	22,35	21,25	64	50	2,9	29842	31711							64																			
8C	09/11/99	HC	CN1+AN	MCJUN98	15	20	23,64	22,47	22,44	21,33	65	51	3,5	30858	32674																										
9C	28/07/99	HC	OUTEIRO	MCJUN98	5		23,65	22,48	22,71	21,58	53	47	2,8	34990	35687																										
V4C	08/02/00	HC	OUTEIRO	MCOUT00	4		22,33	21,22	21,60	20,53						56	51	3,9	24239	25388		72	69	3,8	29717	31154															
V5C	08/02/00	HC	OUTEIRO	MCOUT00	4		22,44	21,33	21,24	20,19	47		3,1			60	47	3,5	28020	30801								3,6	3,8												
V6C	08/02/00	HC	OUTEIRO	MCOUT00	1		22,74	21,61	21,60	20,53																															
10C	17/01/00	HC	CN2+AN2	MCENE00	6	33	23,39	22,23	22,25	21,15	60	51	3,9	25674	27251							78			29515	31161															
LC1C-3D	14/03/00	HC	CN2+AN2	MCENE00	7	50	23,75	22,58	22,34	21,24						73	54	4,2	27880	30026		80					23,5		3,2				78								
LC2C-3D	14/03/00	HC	CN2+AN2	MCENE00	7	28	23,68	22,51	22,33	21,22						73	56	2,9	28924	31536		82					23,6		3,3				78								
LT1C-3D	11/04/00	HC	CN2+AN2	MCENE00	10	33	23,50	22,34	22,34	21,23						65	54	3,6	25846	28551		80					23,7		3,4				74								
LT2C-3D	11/04/00	HC	CN2+AN2	MCENE00	9	29	23,70	22,52	22,30	21,20						73	56	4,0	27286	29542		83					23,5		3,0				76								
HC	PROMEDIO				9	29	23,44	22,28	22,21	21,11	62	50	3,2	28555	30441	67	53	3,88	27032,63	29307		80			29116	31158	23,0	3,3	3,3	7,7	87	76		24,4		8,7	91				
	DESVIACIÓN				4	7	0,45	0,43	0,36	0,34	6	2	0,4	2872	2428	7	3	0,4	1706	2177		4			350	5	2,0	0,3	0,3	0,1	3	2		0,1		0,8	1				
	MÁXIMO				18	50	23,83	22,65	22,71	21,58	70	55	3,9	34990	35687	73	56	4,2	28924	31536		84			29717	31161	24,1	3,6	3,6	7,8	71	78		24,4		9,6	92				
	MÍNIMO				1	20	22,33	21,22	21,24	20,19	47	46	2,8	24651	26681	56	47	2,9	24239	25388		72			28515	31154	18,0	2,9	3,0	7,6	83	74		24,3		8,1	90				
5L101	30/09/98	HL10-1	CV+AN	MCJUN98	8	24	18,07	16,65	16,70	15,38	53	45		19108	18245												18,1	2,8					52			28	19,3		7,7	66	
LT1L101-2D	07/10/98	HL10-1	CV+AN	MCJUN98	8	33	17,87	16,46	16,72	15,41	52	44		17996	18131												18,6	3,0					54								
LT2L101-2D	07/10/98	HL10-1	CV+AN	MCJUN98	8	37	18,58	17,12	16,91	15,58	55	47		18694	19974												18,9	2,8					58								
LC1L101-2D	10/11/98	HL10-1	CV+AN	MCJUN98	10	36	18,31	16,87	16,79	15,47	58	49		18325	20170												18,6	2,5					55								
LC2L101-2D	10/11/98	HL10-1	CV+AN	MCJUN98	8	36	18,17	16,74	16,84	15,52	57	48		18668	19015																										
6L101	24/11/98	HL10-1	CN+AN	MCJUN98	15		18,59	17,13	17,16	15,81	62	55		20210	20312												18,7	3,0					58	30	19,3		8,4	69			
7L101	30/11/98	HL10-1	CN+AN	MCJUN98	10	32	18,20	16,77	16,88	15,56	60	50		21283	22585																										
P1L101	20/01/99	HL10-1	CN+AN	MCJUN98	7	30	18,20	16,77	16,66	15,35	53	46		19252	19640												18,4						63		0,0	0					
P2L101	17/02/99	HL10-1	CN+AN	MCJUN98	5	30	18,35	16,90	16,76	15,44	59	49		20301	20687												18,0						55	28	18,1		7,7	64			
P3L101	10/03/99	HL10-1	CN+AN	MCJUN98	12		18,28	16,84	16,94	15,61	61	52		20887	20985																					29	18,5		2,9	7,2	68
A1L10-1	28/07/99	HL10-1	OUTEIRO	MCOUT99	3																		63																		
A2L10-1	28/07/99	HL10-1	OUTEIRO	MCOUT99	0		18,29	16,85	17,02	15,68	60	53																													
A3L10-1	28/07/99	HL10-1	OUTEIRO	MCOUT99	14																																				
A4L10-1	28/07/99	HL10-1	OUTEIRO	MCOUT99	12		18,49	17,04	17,31	15,95	51	46	2,8																												
A6L10-1	28/07/99	HL10-1	OUTEIRO	MCOUT99	15																																				
A6L10-1	28/07/99	HL10-1	OUTEIRO	MCOUT99	17				17,36	15,99		48	3,0																												
A7L10-1	28/07/99	HL10-1	OUTEIRO	MCOUT99																																					
A8L10-1	28/07/99	HL10-1	OUTEIRO	MCOUT99	20		17,88	16,47	16,77	15,45	53	42	1,9																												
A9L10-1	28/07/99	HL10-1	OUTEIRO	MCOUT99	13																																				
A10L10-1	28/07/99	HL10-1	OUTEIRO	MCOUT99	17		18,74	17,27	16,80	15,48	57	46	2,2																												
A11L10-1	28/07/99	HL10-1	OUTEIRO	MCOUT99	3																																				
7L101	20/12/99	HL10-1	CN1+AN	MCJUN98	12	28	18,33	16,89	16,97	15,64	58	46	3,1	20152	19195											71	57														
8L101	20/12/99	HL10-1	CN1+AN	MCJUN98	13	21	18,48	17,03	16,96	15,63	56	48	3,1	19973	20329											71	58														
HL10-1	PROMEDIO				10	29	18,30	16,86	16,91	15,58	57	48	2,7	19587	19939											70	57														
	DESVIACIÓN				5	7	0,24	0,22	0,20	0,18	3	3	0,5	988	1177												1	3													
	MÁXIMO				17	37	18,63	17,16	17,32	15,96	61	54	3,1	21065	21705												71	61													
	MÍNIMO				0	15	18	16,46	16,66	15,35	51	42	1,9	17996	18131	</																									



Tabla 4.3.4.4-1: Resumen de las propiedades de cada material

prop	$\rho_{c,sub}$	$\rho_{c,cil}$	$f_{cm,sub,2}$	$f_{cm,2}$	$E_{cm,2}$	$f_{cm,sub,3}$	$f_{cm,3}$	$E_{cm,3}$	$f_{cm,sub,28}$	$f_{cm,28}$	$E_{cmB,28}$	$f_{cm,2}$	$f_{cm,3}$	$f_{ct,fl,m,j}$	$f_{cm,pr,j}$	$f_{cm,28}$	$f_{cm,28}$	$f_{cm,pr,28}$
	$kN/m^3$		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
HC	23	22	62	50	30441	67	53	4	29307	80		3	3	8	67	9	91	
HL10-1	18	17	57	48	19939				70	57		3		7	56	3	6	53
HL3-1	18	17	58	49	20326							3		6	51	3	8	65
HL10-2	20	19				70	60	3	24868	75			3		67	4		

Tabla 4.3.4.4-2: Coeficiente de eficacia referido al HC

EF(prop,MAT)	$\rho_{c,sub}$	$\rho_{c,cil}$	$f_{cm,sub,2}$	$f_{cm,2}$	$E_{cm,2}$	$f_{cm,sub,3}$	$f_{cm,3}$	$E_{cm,3}$	$f_{cm,sub,28}$	$f_{cm,28}$	$E_{cmB,28}$	$f_{cm,2}$	$f_{cm,3}$	$f_{ct,fl,m,j}$	$f_{cm,pr,j}$	$f_{cm,28}$	$f_{cm,28}$	$f_{cm,pr,28}$
HC	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
HL10-1	1.00	0.97	1.17	1.22	1.07				1.12			1.03		1.15	1.08	0.92	0.74	
HL3-1	1.00	0.97	1.22	1.27	0.86							1.01		1.03	0.98	1.13	0.92	
HL10-2	1.00	0.97				1.22	1.30	0.99	1.09		1.04		1.13		1.16			

Tabla 4.3.4.4-3: Cociente entre las propiedades de los hormigones ligeros y el HC

$\frac{prop(MAT,j)}{prop(HC,j)}$	$\rho_{c,sub}$	$\rho_{c,cil}$	$f_{cm,sub,2}$	$f_{cm,2}$	$E_{cm,2}$	$f_{cm,sub,3}$	$f_{cm,3}$	$E_{cm,3}$	$f_{cm,sub,28}$	$f_{cm,28}$	$E_{cmB,28}$	$f_{cm,2}$	$f_{cm,3}$	$f_{ct,fl,m,j}$	$f_{cm,pr,j}$	$f_{cm,28}$	$f_{cm,28}$	$f_{cm,pr,28}$
HC	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
HL10-1	0.78	0.76	0.92	0.95	0.83				0.88			0.81		0.90	0.84	0.72	0.58	
HL3-1	0.77	0.75	0.94	0.98	0.67							0.78		0.80	0.76	0.87	0.71	
HL10-2	0.86	0.84				1.05	1.13	0.86	0.94		0.90		0.98		1.00			



#### 4.3.4.4. Comparación entre los diversos hormigones

En este apartado se pretende establecer una comparación entre las propiedades resistentes de los materiales ensayados.

Esta comparación, a nuestro juicio, no debe establecerse en términos absolutos, sino que está condicionada al ahorro en peso de cada material.

En la Tabla 4.3.4.4-2 se observan los valores de coeficiente de eficacia obtenidos para las propiedades más relevantes.

Se puede apreciar que el coeficiente de eficacia es superior en el HL10-2 al resto de los materiales, superior a la unidad en todos los casos, excepto en el módulo de deformación, en que toma el valor de 0.99.

Por lo que respecta al coeficiente de eficacia del HL10-1, sólo adopta un valor menor de la unidad para el módulo de deformación a los dos días.

En la Tabla 4.3.4.4-3 se presentan las propiedades de los hormigones ligeros, referidas a las del hormigón convencional a la misma edad, mediante los valores de:

$$\frac{prop(MAT, j)}{prop(HC, j)}$$

#### 4.3.5. RETRACCIÓN Y ENTUMECIMIENTO

##### 4.3.5.1. Introducción

La determinación de la deformación por retracción o entumecimiento se realizó de dos formas:

- En cada amasada, se confeccionaba una probeta cilíndrica en un molde especial (MART98) con dos índices embebidos en la cara superior e inferior, siguiendo las directrices de la normativa ASTM C 490-96, para evaluar posteriormente los cambios de longitud (véase la Fotografía 4.3.5.1-1). Tras el desmoldado, estas probetas se enviaron al Laboratorio de Cementos Cosmos, en Oural. Allí se tomaba la medida de referencia, y se conservaban las probetas sumergidas durante un mes, a 20 °C. Posteriormente se retiraban y conservaban en el Laboratorio de Cementos Cosmos en unas condiciones de humedad (65%) y temperatura (20 °C) controladas. Al cabo de un año se repetía el ciclo. Durante todo este tiempo se realizaban medidas periódicas, para evaluar la capacidad de absorción de agua y los cambios de longitud.
- En cada amasada se fabricaron también probetas prismáticas de 100×100×285 mm aproximadamente (véanse las Fotografías 4.3.5.1-2 a 4.3.5.1-5). Antes del endurecimiento de las mismas se colocaban discos de extensometría adheridos a clavos, en la cara superior, a una distancia aproximada de 100 mm. Este sistema presenta el inconveniente de que los discos así dispuestos no pertenecen necesariamente a un plano horizontal, paralelo a la cara inferior de la probeta; la ventaja es que se dispone de medidas antes del desmoldado, tan pronto como el hormigón ha endurecido, lo que para este tipo de hormigón se consigue a las pocas

horas del hormigonado. Las probetas así confeccionadas se conservan en el mismo ambiente que el resto de las probetas de la amasada, dentro del Laboratorio de Construcción, en un ambiente conocido pero no controlado (Gráfica 4.3.5.2-1).

El almacenamiento de las probetas para la evaluación de la retracción y el entumecimiento en el Laboratorio de Ingeniería de la Construcción se realizó sobre apoyos deslizantes de vidrio (canicas), a fin de no coartar la deformación de las probetas.

En este documento se emplea la microdeformación para expresar las medidas experimentales de deformación, indistintamente con las notaciones especificadas en la Tabla 4.3.5.1-1:

Tabla 4.3.5.1-1

Microdeformación	$\mu\varepsilon = 10^{-6}$	ue
------------------	----------------------------	----

El criterio de signos empleado es de deformaciones de tracción positivas, por lo que, en las Gráficas siguientes las deformaciones de retracción presentan signo negativo, y las de entumecimiento positivo.



Fotografía 4.3.5.1-1: Molde de probeta cilíndrica de retracción (MART98)



Fotografía 4.3.5.1-2: Ajuste de la posición de los discos de extensometría en el hormigón fresco



Fotografía 4.3.5.1-3: Ajuste de la posición de los discos de extensometría en el hormigón fresco



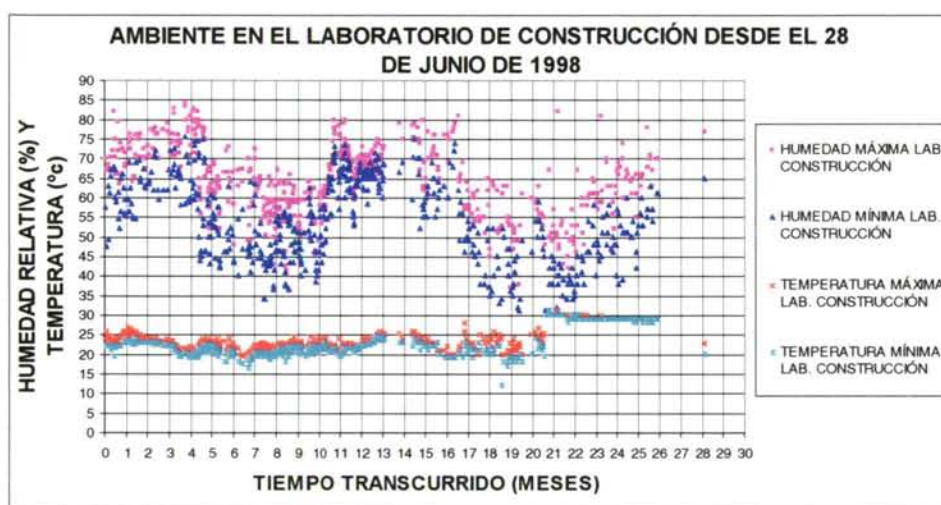
Fotografía 4.3.5.1-4: Discos de extensometría embebidos en la superficie superior de las probetas





Fotografía 4.3.5.1-5: Almacenamiento de las probetas de retracción (izquierda) y entumecimiento (derecha) sobre apoyos deslizantes

#### 4.3.5.2. Ambiente en el Laboratorio de Construcción



Gráfica 4.3.5.2-1

En la Gráfica 4.3.5.2-1 se pueden apreciar los ciclos anuales, en las lecturas de humedad relativa. La humedad relativa varía diariamente un 30%. Respecto a la temperatura, generalmente se mantiene constante, entre los 20 y los 25 °C, exceptuando en el verano del 2000, en que aumentó hasta 30 °C.

La temperatura del agua en que están inmersas las probetas de entumecimiento permanece más constante, en torno a los 20 °C.

#### 4.3.5.3. Hormigón Convencional

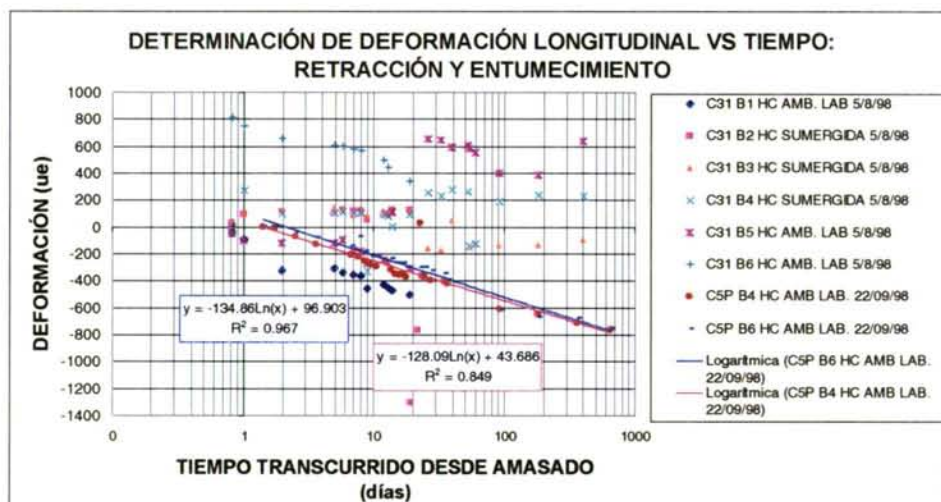
La variación de deformación por entumecimiento y retracción se refleja en la Gráfica 4.3.5.3-1, en la que se aprecia que el comportamiento deformacional es aproximadamente logarítmico con el tiempo. La deformación de retracción aproximada al cabo de un año es de  $-500$  ue, y al cabo de dos años alcanzada por las probetas de HC es de  $-700$  ue.

Por lo que respecta al entumecimiento de las probetas sumergidas, los valores máximos alcanzados son de  $-330$  ue, si bien se aprecia una mayor dispersión de resultados.

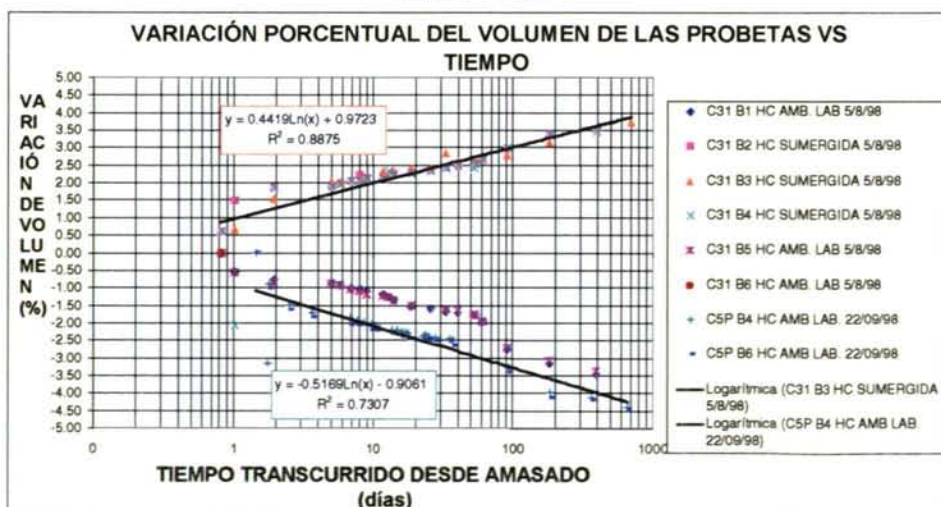
En la Gráfica 4.3.5.3-2 aparecen los datos correspondientes a la variación porcentual de volumen respecto al tiempo. Esta se ha determinado pesando las probetas a lo largo del tiempo: la diferencia de peso se debe a pérdidas/aportaciones de masa de agua que, siendo la densidad casi igual a la unidad, corresponden a la pérdida/aportación de volumen de agua. La variación porcentual de volumen se refiere al volumen de la probeta prismática, determinado midiendo las aristas con una precisión de 1 mm.

En esta misma gráfica, 4.3.5.3-2, se aprecia un comportamiento marcadamente logarítmico de la variación porcentual de volumen respecto al tiempo, tanto para las probetas sumergidas (aumento de volumen) como para las conservadas en el ambiente del laboratorio (disminución de volumen). La variación porcentual de volumen al año es del 3.5% de entumecimiento, en las probetas sumergidas, y del 4% en las probetas al aire. La variación porcentual registrada al cabo de dos años es del 4% de entumecimiento y del 4.25% de retracción.

Analizando la Gráfica 4.3.5.3-3, correspondiente a las probetas de Oural sometidas a los ciclos anteriormente descritos, se aprecia que la retracción máxima alcanzada es de -650 ue aproximadamente.

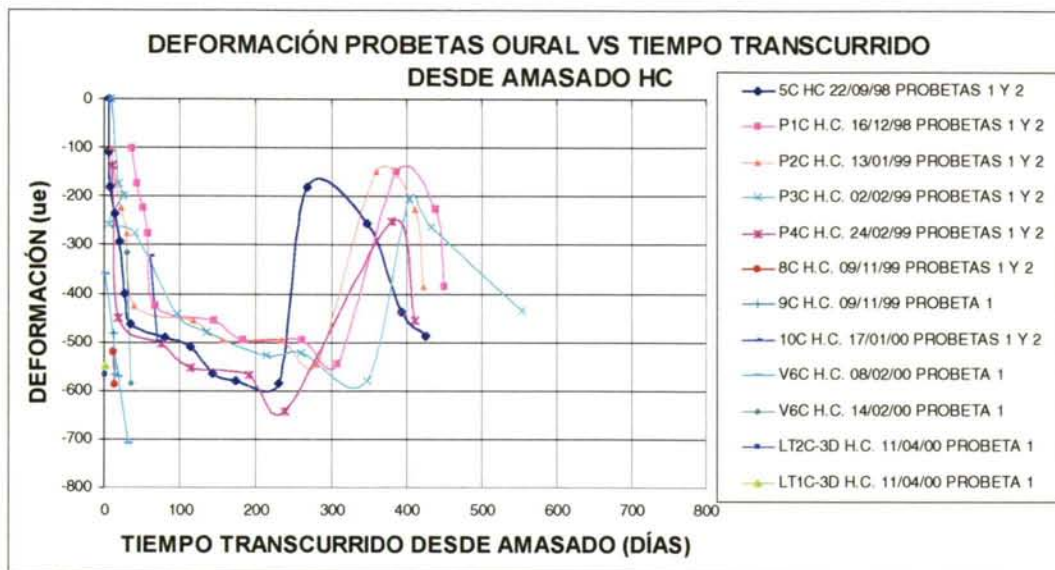


Gráfica 4.3.5.3-1



Gráfica 4.3.5.3-2





Gráfica 4.3.5.3-3

#### 4.3.5.4. Hormigón ligero HL10-1

En las Gráficas 4.3.5.4-1 y 4.3.5.4-2 se aprecia la deformación experimentada por las probetas de hormigón ligero HL10-1 a lo largo del tiempo. Las probetas conservadas en el ambiente del laboratorio presentan una deformación de retracción al año de entre  $-500$  y  $-800$  ue, sensiblemente superior a la que presentaba el hormigón convencional en el Apartado 4.3.5.4. Por lo que respecta a la deformación de entumecimiento de las probetas conservadas en agua, los valores alcanzados al año rondan las  $-200$  ue. Se aprecia en las primeras edades (hasta los cuatro días) un aumento de volumen de las probetas, probablemente debido a la hidratación del cemento y la producción de calor de hidratación consiguiente, y a una posible aportación de agua de curado, que puede producir en algunos casos un ligero entumecimiento inicial (WEIG74).

Al igual que en el apartado anterior, la ley de variación porcentual de volumen con el tiempo sigue un comportamiento marcadamente logarítmico. Al cabo de un año el entumecimiento de las probetas sumergidas es de un 1% en volumen y la retracción de un 4% aproximadamente.

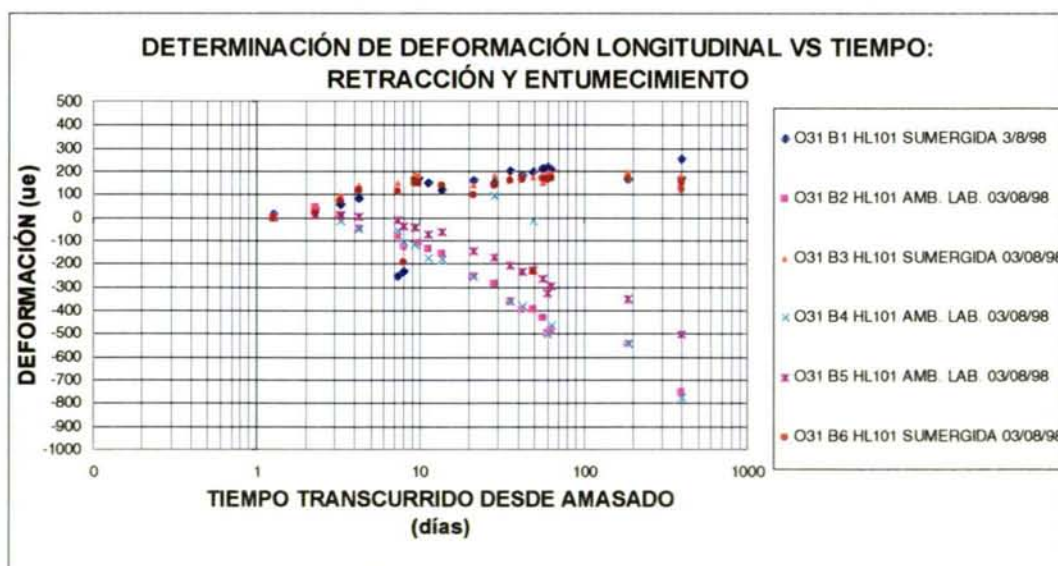
En la Gráfica 4.3.5.4-3 se presenta el comportamiento deformacional de las probetas de hormigón ligero HL10-1 almacenadas en el ambiente del laboratorio, y de las probetas de HC de las amasadas realizadas con cemento y arena de la misma partida. Se puede apreciar que varias de las probetas de hormigón HL10-1 presentan una deformación de retracción considerablemente superior a la de las probetas de HC, a la misma edad. A los dos años, la deformación de retracción del HC no supera las  $-900$  ue, y la del hormigón ligero supera en algunos casos este valor, alcanzando las  $-1200$  ue.

En la Gráfica 4.3.5.4-4 se aprecia la variación porcentual de volumen respecto al tiempo. Se aprecia claramente que la variación de volumen es superior en las probetas de HL10-1, alcanzando el  $-8\%$  a los dos años, mientras que la variación volumétrica alcanza el  $-5\%$  para las probetas de HC, lo que supone una variación volumétrica del 60% superior en el caso del HL10-1. El comportamiento de las probetas de HC y de HL10-1 sigue una ley aproximadamente logarítmica respecto al tiempo.

Se aprecia en la Gráfica 4.3.5.4-4 un entumecimiento a tempranas edades elevado, de aproximadamente 150 ue, a las 24 horas del hormigonado. Esta deformación longitudinal, si aplicamos un coeficiente de dilatación térmica medio (WEIG74) de  $10^{-5}$ , significa que el hormigón ha experimentado un aumento de temperatura de  $+15^{\circ}\text{C}$ . Este entumecimiento se produce en el entorno de las 24 horas, dentro de la fase de hidratación del cemento (MART98), cuando aún la probeta no ha sido desmoldada, por lo que la disipación del calor está dificultada por el molde.

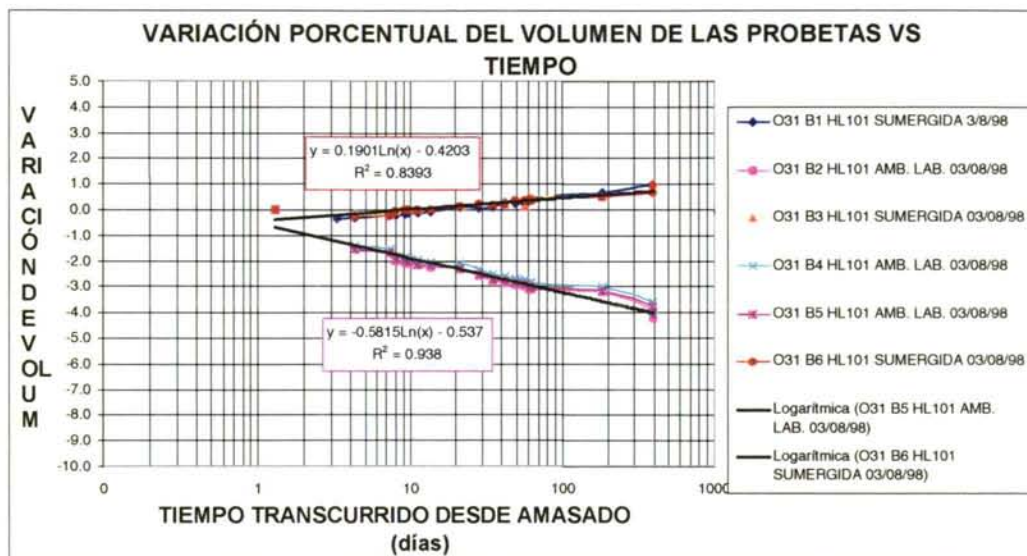
La retracción superior en el HL10-1 respecto al HC puede estar motivada en parte por la gran cantidad de agua contenida en los áridos (humedad del 10%). Weigler y Karl postulan la existencia de migración entre el agua de la pasta de cemento y los poros accesibles de los áridos, en equilibrio dinámico (WEIG74). El exceso de humedad de los áridos de amasado puede producir un aumento del agua no combinada de la pasta, agua susceptible de evaporarse fácilmente. En el siguiente apartado compararemos la retracción medida para el hormigón HL3-1, similar al HL10-1 en todo, excepto en la cantidad de agua total.

En la Gráfica 4.3.5.4-5 se observan la deformación de las probetas conservadas en Oural, sometidas a los ciclos anteriormente descritos, respecto al tiempo. La retracción máxima del HL10-1, medida en las probetas de Oural es de  $-750$  ue, valor superior a la retracción máxima del HC en un 15%. Realmente se aprecia que este método es más preciso que el método alternativo empleado, si bien no se dispone de resultados de medidas a tempranas edades. Dado que este método de ensayo se realiza en un ambiente controlado, y que la dispersión de resultados es menor, realmente concluimos que la retracción del HL10-1 al menos igual a la que presenta el HC, siendo el valor máximo un 15% superior al que presenta el HC.

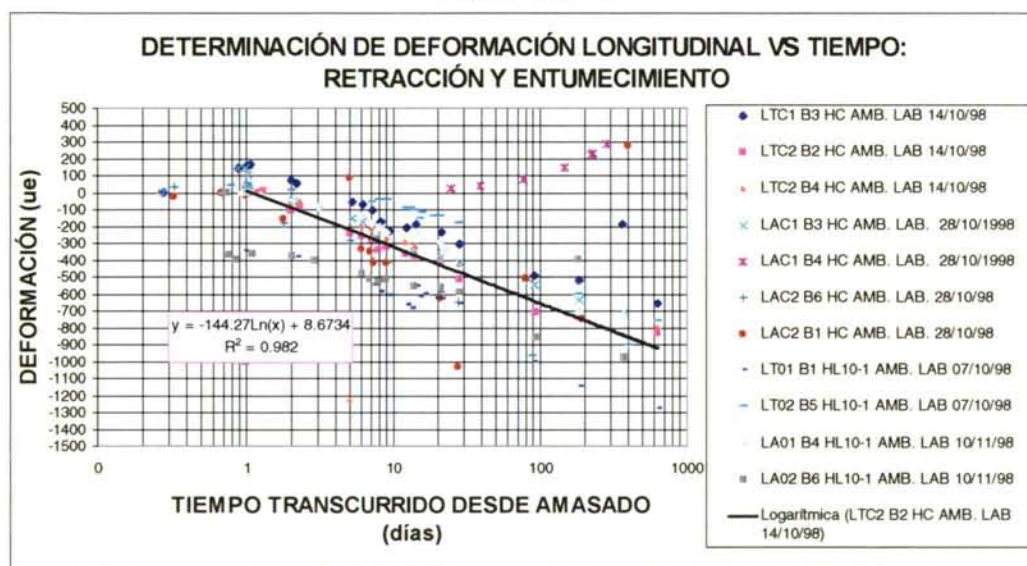


Gráfica 4.3.5.4-1

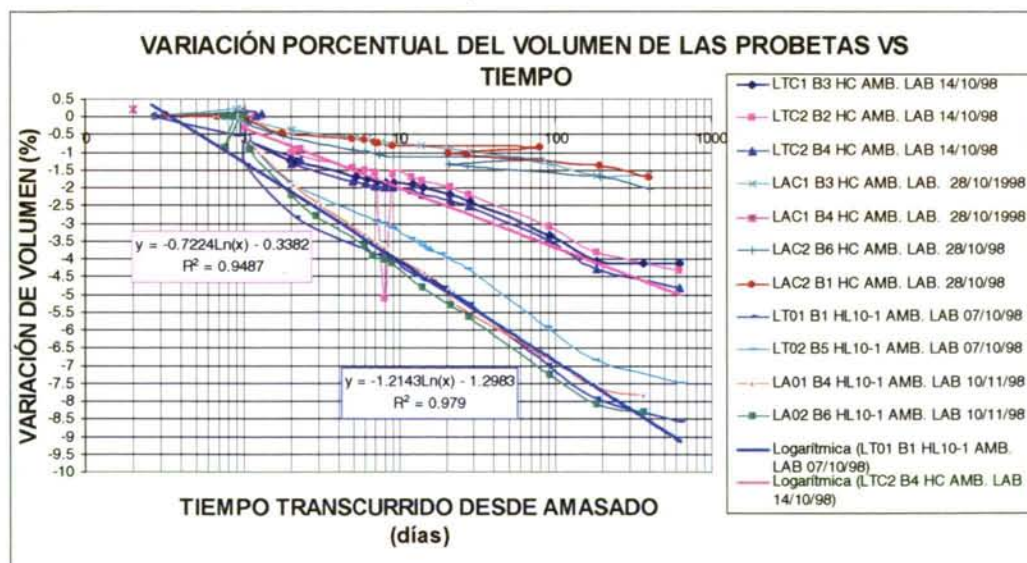




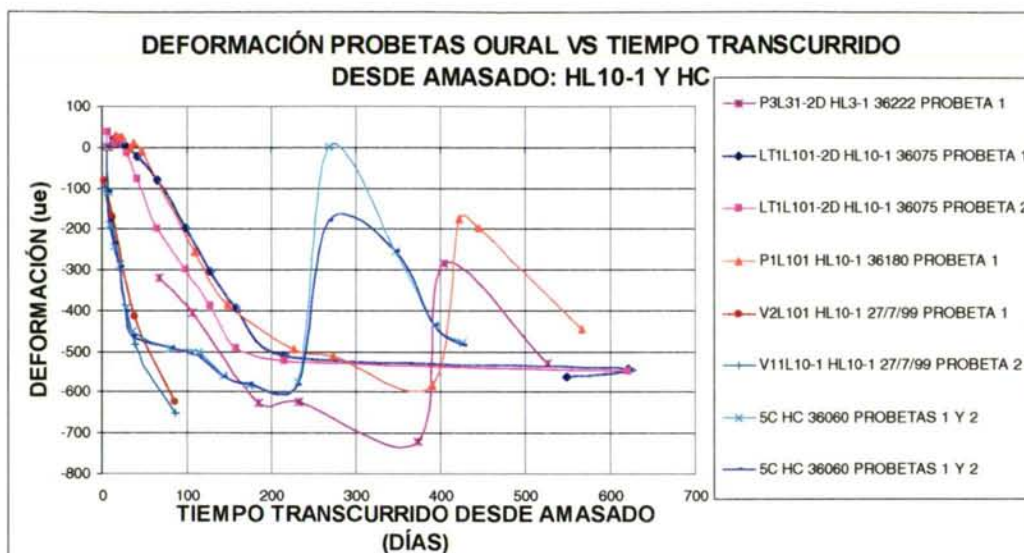
Gráfica 4.3.5.4-2



Gráfica 4.3.5.4-3



Gráfica 4.3.5.4-4



Gráfica 4.3.5.4-5

#### 4.3.5.5. Hormigón ligero HL3-1

En la Gráfica 4.3.5.5-1 se aprecia el comportamiento deformacional de probetas de HL3-1 sumergidas en agua y otras conservadas en el laboratorio. La probeta 331 B3 presenta resultados anómalos (se conserva sumergida y, sin embargo, aparentemente presenta retracción en etapas intermedias). Las dos probetas sumergidas restantes presentan un entumecimiento al cabo de un año de 300 ue, y al cabo de dos años de -375 ue.

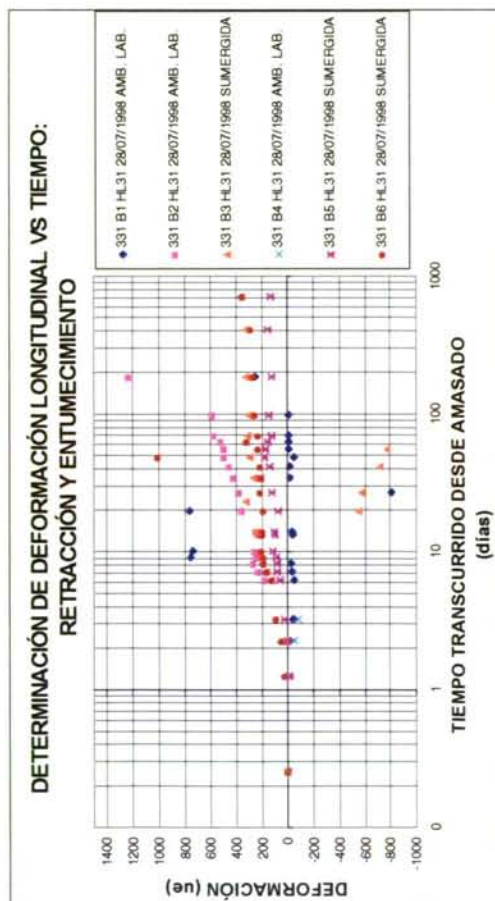
Se aprecia un comportamiento anómalo de las probetas 331 B2 (almacenada en el ambiente del laboratorio y, que paradójicamente presenta entumecimiento). Las probetas conservadas al aire no proporcionan resultados verosímiles.

En la Gráfica 4.3.5.5-2 se aprecia la variación volumétrica de las probetas con el tiempo. Las probetas sumergidas presentan al año un aumento de volumen del 1% como máximo. Las probetas conservadas al aire presentan una contracción del 4 al 5% al año del amasado.

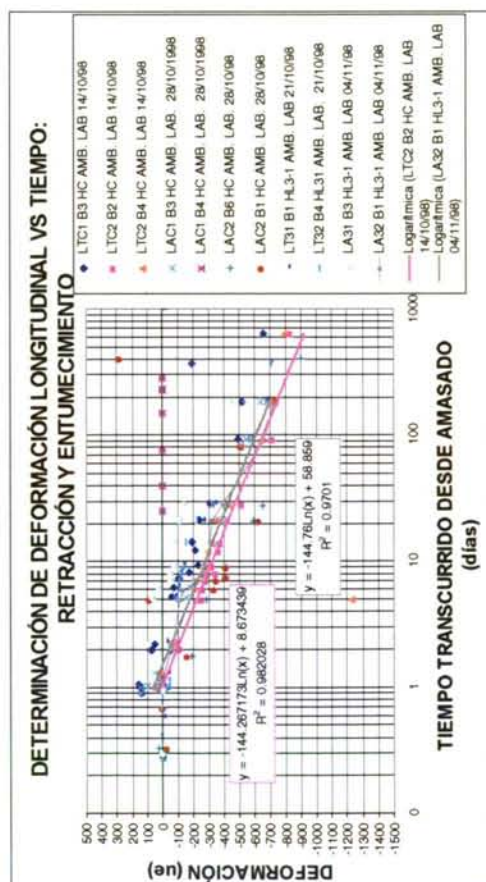
En la Gráfica 4.3.5.5-3 se aprecia la variación deformacional con el tiempo de probetas de HL3-1 y de probetas de HC conservadas al aire, amasadas en la misma época. Se aprecia que los valores de retracción de las probetas de HL3-1 son similares a los que presenta el HC, en todo el período considerado. La retracción al cabo de un año no supera en ningún caso las -700 ue, y al cabo de dos años las -800 ue.

Sin embargo, al analizar la variación volumétrica (Gráfica 4.3.5.5-4) se aprecia que la contracción es superior en el caso de las probetas de HL3-1, alcanzándose un valor del 6% a los 100 días para el HL3-1, y del -4% para las probetas de HC a la misma edad. No se aprecia con tanta claridad como en el apartado anterior la aparición de entumecimiento durante los primeros días, si bien en el entorno del primer día se aprecia un ligero aumento de volumen de las probetas de ambos materiales.

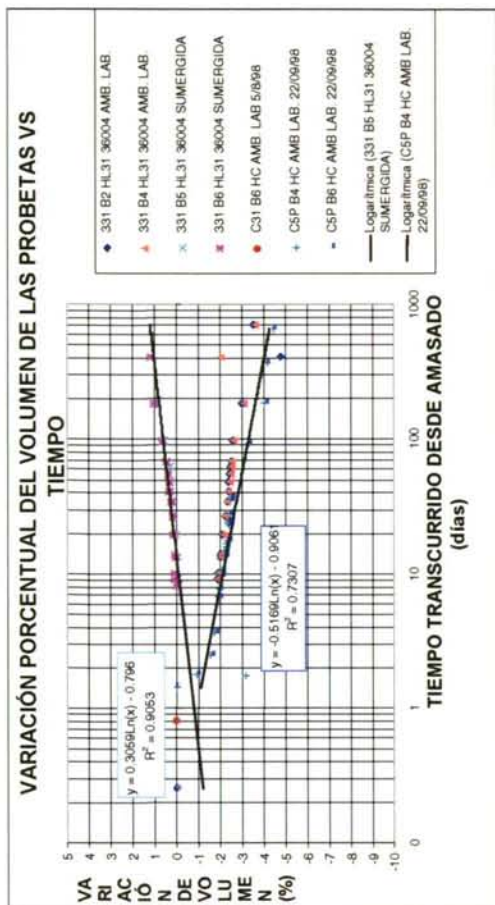




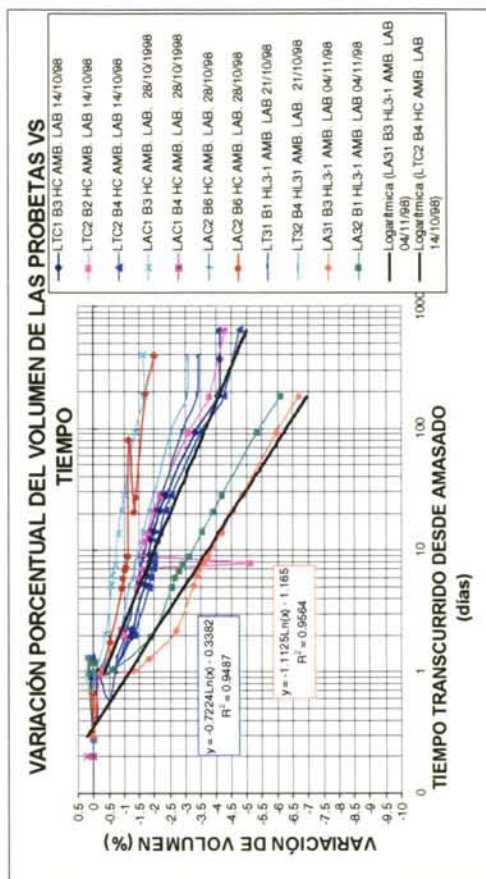
Gráfica 4.3.5.5-1



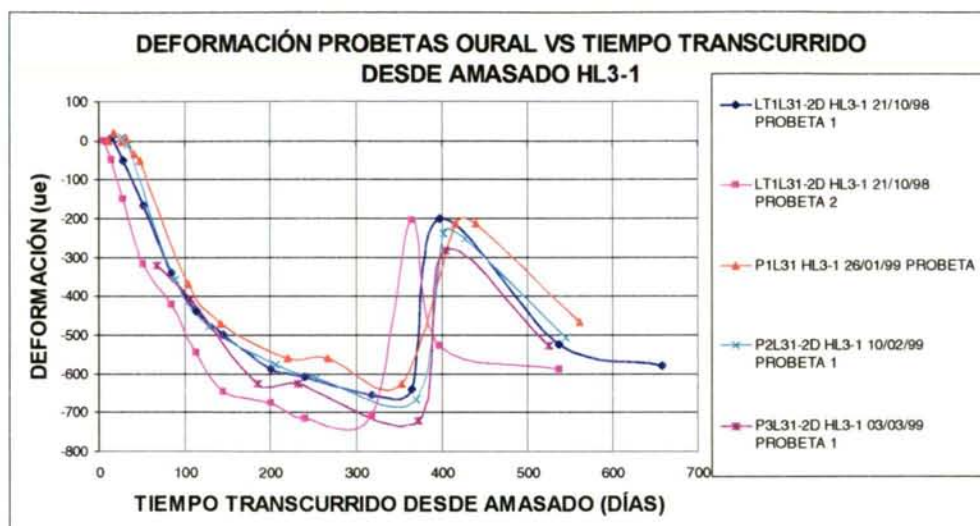
Gráfica 4.3.5.5-3



Gráfica 4.3.5.5-2



Gráfica 4.3.5.5-4



Gráfica 4.3.5.5-5

En la Gráfica 4.3.5.3-4 se aprecia un entumecimiento a tempranas edades elevado, del orden de 175 ue. Este entumecimiento se produce en el entorno de las 24 horas, dentro de la fase de hidratación del cemento (MART98), cuando aún la probeta no ha sido desmoldada, por lo que la disipación del calor está dificultada por el molde.

Si comparamos los valores obtenidos con los del apartado anterior, se aprecia que el hormigón ligero HL10-1, de mayor cantidad de agua total, presenta una retracción y una contracción considerablemente superior a la que presentan el HC y el HL3-1, probablemente debido a una mayor relación agua eficaz/cemento.

Analizando la Gráfica 4.3.5.5-5 se aprecia que la retracción máxima registrada en las probetas de Oural es de -720 ue, valor menor a la que presenta el HL10-1 y a la del HC. Este valor es un 10% superior al máximo valor del HC.

#### 4.3.5.6. Hormigón ligero HL10-2

En la Gráfica 4.3.5.5-1 se aprecia que la retracción del hormigón ligero HL10-2, durante el período de medida, no supera a la que presenta el HC. A los 100 días, la retracción del HC alcanza las -500 ue, mientras que la del HL10-2 ronda los -400 ue. Aquí también se aprecia en la Gráfica 4.3.5.3-1 un entumecimiento a tempranas edades elevado, del orden de hasta 300 ue en el caso del HC, y 150 ue en el caso del HL10-2 a las 24 horas del hormigonado. Esta deformación longitudinal, si aplicamos un coeficiente de dilatación térmica medio (WEIG74) de  $10^{-5}$ , significa que el hormigón ha experimentado un aumento de temperatura de +30 °C para el HC y de 15 °C para el HL10-2. Este entumecimiento se produce en el entorno de las 24 horas, dentro de la fase de hidratación del cemento (MART98), cuando aún la probeta no ha sido desmoldada, por lo que la disipación del calor está dificultada por el molde. El período de entumecimiento inicial del HL10-2 es más prolongado en el caso del HL10-2, alcanzando los 6 días.

En la Gráfica 4.3.5.5-2 se aprecia que la variación volumétrica del HC es de un -3% a los 100 días, y la del HL10-2 es superior desde un inicio, alcanzando el -3.5% al mes del hormigonado. En torno a las 24 horas posteriores al hormigonado, se aprecia un aumento de volumen en ambos hormigones.



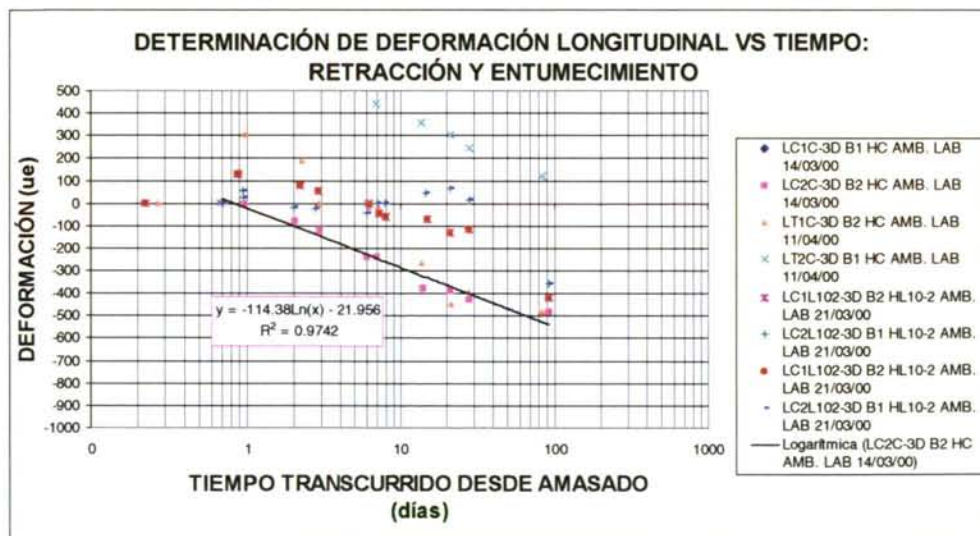
Sin embargo, los valores medidos de retracción en las probetas de Oural para este tipo de hormigón son considerablemente superiores a los que presenta el HL10-1 a la misma edad, como se puede apreciar en la Gráfica 4.3.5.5-5. La diferencia sólo puede estar motivada por la cantidad de agua de amasado, y el empleo del agente reductor de agua Glenium 52. Realmente, la cantidad de agua total de este hormigón es menor a la del HL10-1. El valor máximo medido de retracción, de  $-800$  ue, es superior al máximo del HC a la misma edad en un 30% aproximadamente.

#### 4.3.5.7. Conclusiones

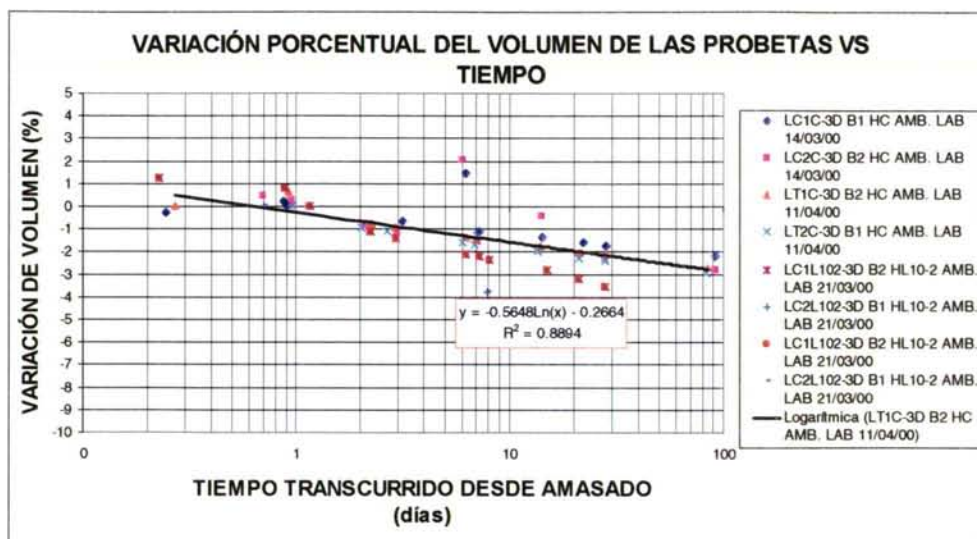
Los valores de retracción son fundamentales a la hora de evaluar las pérdidas diferidas del hormigón pretensado. De hecho, las pérdidas por retracción son directamente proporcionales a la variación de deformación experimentada tras la transferencia (EHE98).

Respecto a la retracción y entumecimiento, se concluye que:

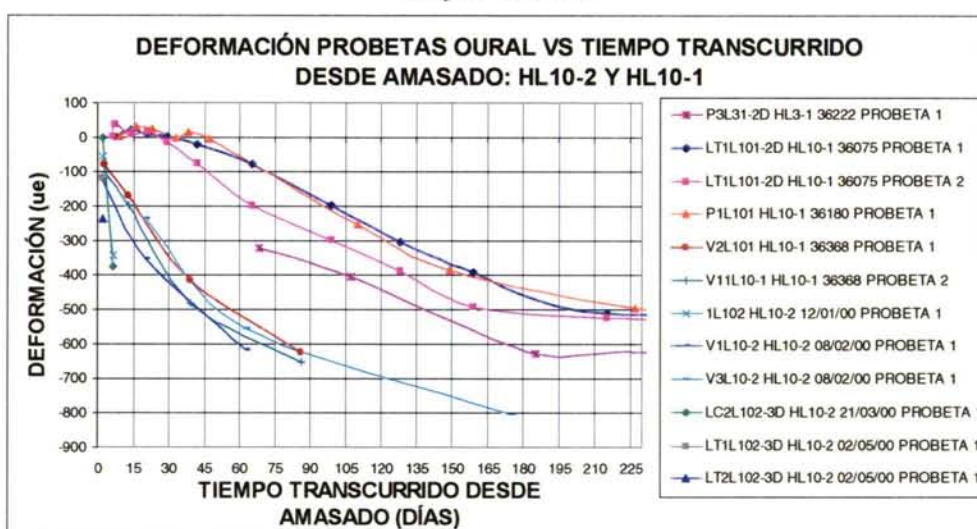
1. La retracción que presentan los hormigones HL3-1 y HL10-1 durante el primer año es superior a la que presenta el HC, siendo superior en un 10% para el HL3-1 y en un 15% para el HL10-1.
2. La retracción del HL3-1 es ligeramente inferior a la que presenta el HL10-1, lo que indica una relación {agua eficaz}/{cemento} superior en el HL10-1 que en el HL3-1, dado que el resto de los componentes del hormigón es idéntico para ambas dosificaciones.
3. El hormigón HL10-2 presenta un valor de retracción a primeras edades acusado, superando la retracción del HC y del HL10-1, a pesar de que la cantidad de agua total por metro cúbico esta dosificación. La retracción máxima a los seis meses es un 30 % superior a la que presenta el hormigón HC.
4. En general se detecta una buena correlación entre ambos métodos de evaluación de la retracción, a pesar de las diferencias de fabricación, instrumentación y ambiente a que están sometidas las probetas.



Gráfica 4.3.5.6-1



Gráfica 4.3.5.6-2



Gráfica 4.3.5.6-3

#### 4.3.6. DIAGRAMAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN A LA EDAD DE TRANSFERENCIA

Los diagramas tensión-deformación han sido obtenidos instrumentando probetas cilíndricas con galgas extensométricas de 60 mm de longitud: dos galgas diametralmente opuestas, longitudinales y centradas verticalmente respecto a la probeta, y dos galgas diametralmente opuestas, horizontales y centradas en la altura del elemento.

Tanto las galgas como la señal de la prensa, correspondiente a la fuerza aplicada, se toman desde el S.A.D. de la marca Desin. Dado que el control del ensayo de rotura de probetas se realiza por fuerza, y no por deformación, no se dispone de valores de la deformación última de los materiales, ni de la rama post-pico.

Este método permite, sin embargo, obtener las ramas iniciales del diagrama tensión-deformación de probetas ensayadas. En este apartado se presentan los diagramas de HC,



HL10-1 y de HL10-2, resultantes de los ensayos de módulo de deformación, y del posterior ensayo a rotura efectuado a la velocidad normalizada establecida por la normativa.

#### **4.3.6.1. Diagramas de HL10-1 y HC, a los 2 días**

En este apartado se presentan los diagramas correspondientes a los ensayos realizados sobre dos probetas cilíndricas de 10×20 cm, instrumentadas con bandas de 60 mm de longitud, dos longitudinales y dos transversales diametralmente opuestas y centradas respecto a la altura de la probeta. El ensayo se realizó a las 48 horas del hormigonado.

En la Gráfica 4.3.6.1-1 se aprecia el comportamiento tensión-deformación longitudinal de ambos hormigones, en un ensayo de módulo de deformación, tras el cual se llevó la probeta hasta rotura. Se observa que el ciclo de histéresis del hormigón convencional es más abierto que el del hormigón ligero, en el que prácticamente se confunden las ramas de carga y de descarga. Además, se aprecia la menor rigidez del hormigón ligero, que presenta un módulo de deformación longitudinal sensiblemente inferior.

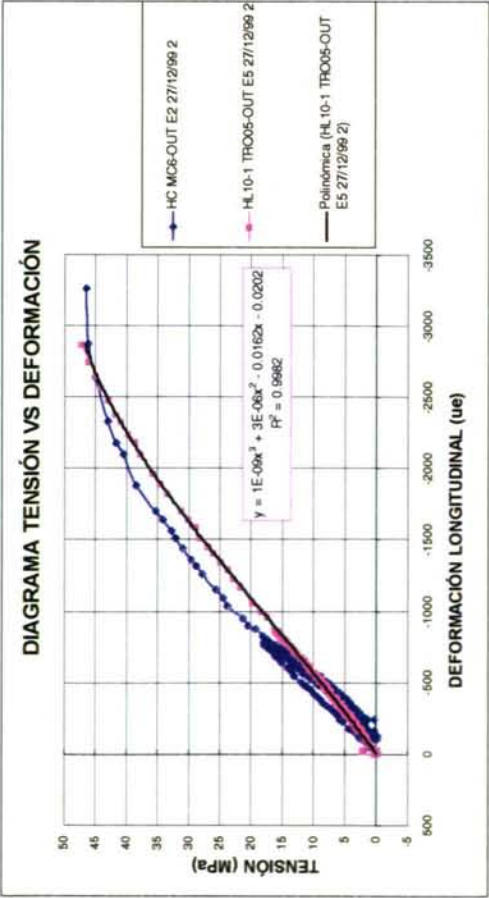
Como se puede apreciar el hormigón ligero presenta un comportamiento sensiblemente lineal hasta el 65% de la tensión máxima, lo que no sucede con el HC, que es lineal hasta el 50% aproximadamente de su tensión máxima. El área bajo la curva en la zona plástica es más reducida que la encerrada por la rama plástica del diagrama de HC. Las cargas máximas registradas para ambos hormigones son similares, si bien la deformación longitudinal es superior para el HC.

La deformación máxima registrada en ambas probetas, de -2800 ue para el HL10-1 y de -3250 ue para el HC, es superior en valor absoluto a la deformación máxima habitual en ensayos a compresión simple, de aproximadamente -2000 ue (EHE98, E21395). Creemos que esto es debido a que la longitud de las bandas extensométricas empleadas en estos ensayos es de 60 mm: el valor de la deformación media variará según la longitud instrumentada, debido al efecto de rozamiento de la probeta y los platos de la prensa.

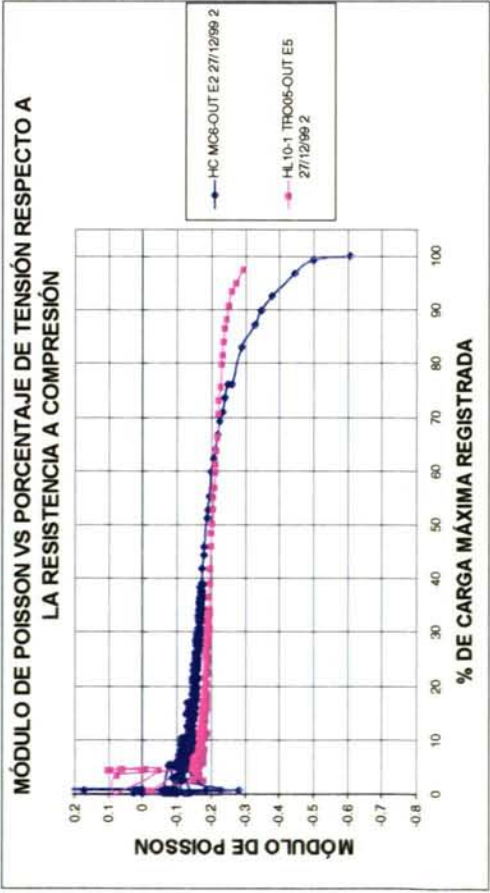
En la Gráfica 4.3.6.1-2 se observa el comportamiento tensión-deformación transversal de ambas probetas. La deformación transversal del HC para valores elevados de carga es muy elevada, considerablemente superior a la correspondiente al HL10-1. La ductilidad transversal es superior en el HC que en HL10-1.

En la Gráfica 4.3.6.1-3 se presentan los valores de las deformaciones transversales frente a las deformaciones longitudinales para ambos ensayos. En la Gráfica 4.3.6.1-4 se presenta el valor del módulo de Poisson a lo largo del ensayo, para ambos materiales. Se aprecia que dicho valor se mantiene menor que 0.2 para ambos hormigones, hasta el 60% de la carga máxima registrada.

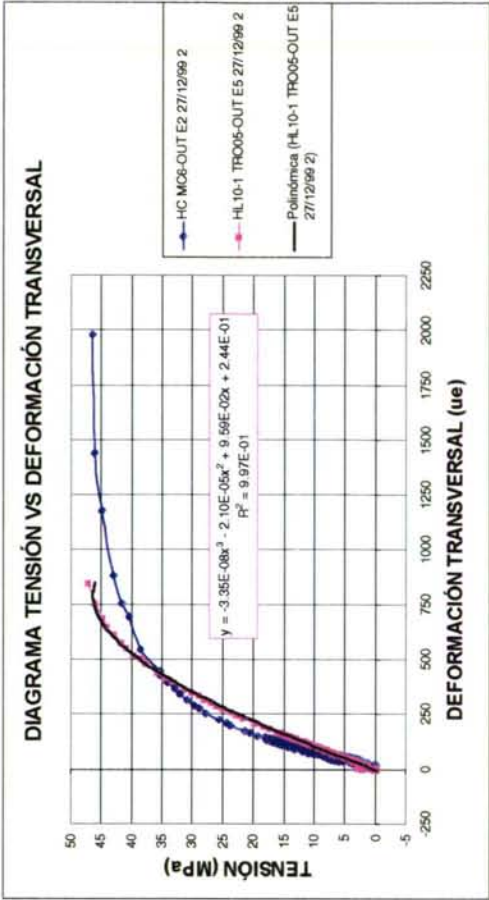
En las Gráficas 4.3.6.1-5 a 4.3.6.1-8 se aprecian los valores de los módulos de deformación longitudinal y módulo de Poisson correspondientes a las ramas de carga y descarga de los ciclos del ensayo de módulo. Se aprecia que el módulo de deformación longitudinal es superior para el HC, y sin embargo los valores del módulo de Poisson son ligeramente superiores en valor absoluto para el HL10-1, muy similares, en todo caso, a -0.2 en ambos casos.



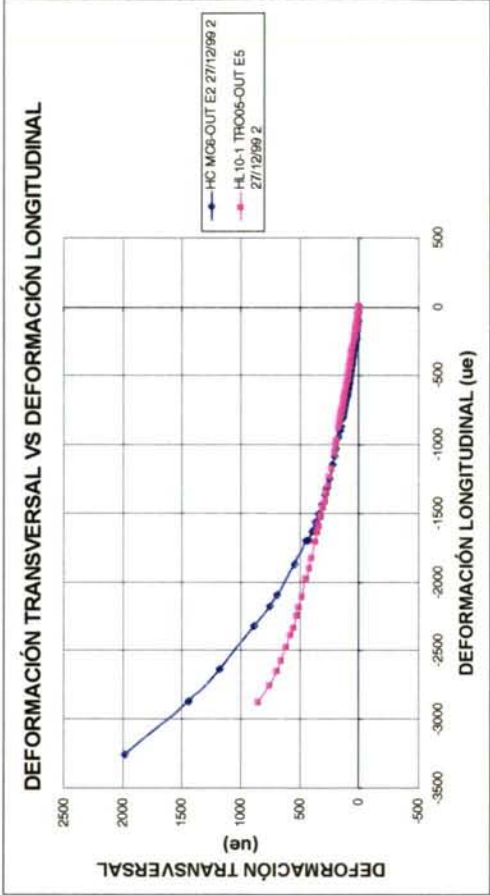
Gráfica 4.3.6.1-1



Gráfica 4.3.6.1-3

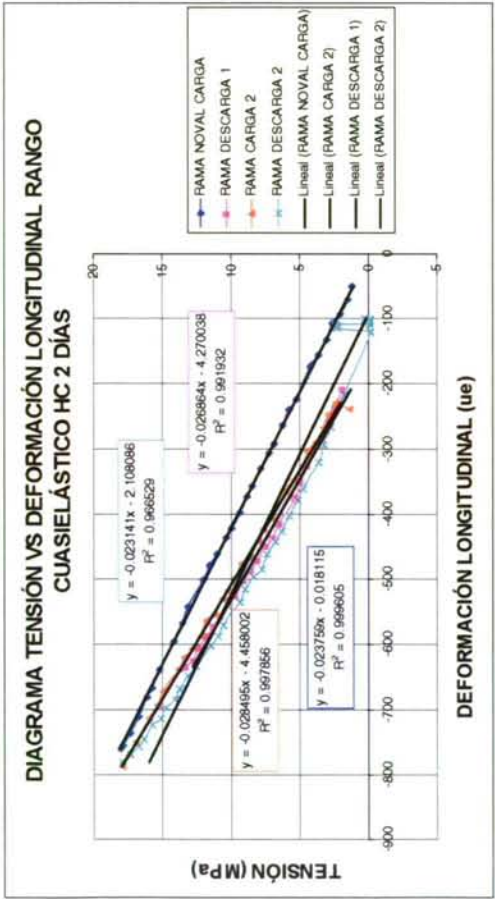


Gráfica 4.3.6.1-2

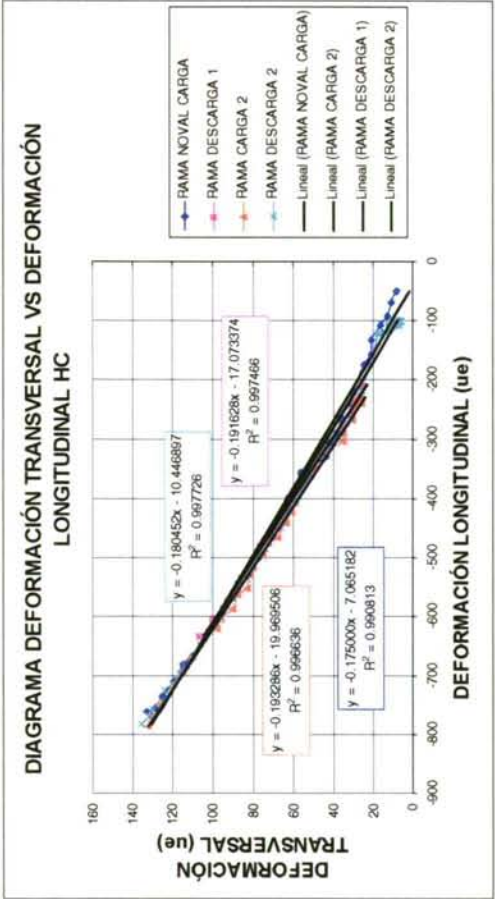


Gráfica 4.3.6.1-4

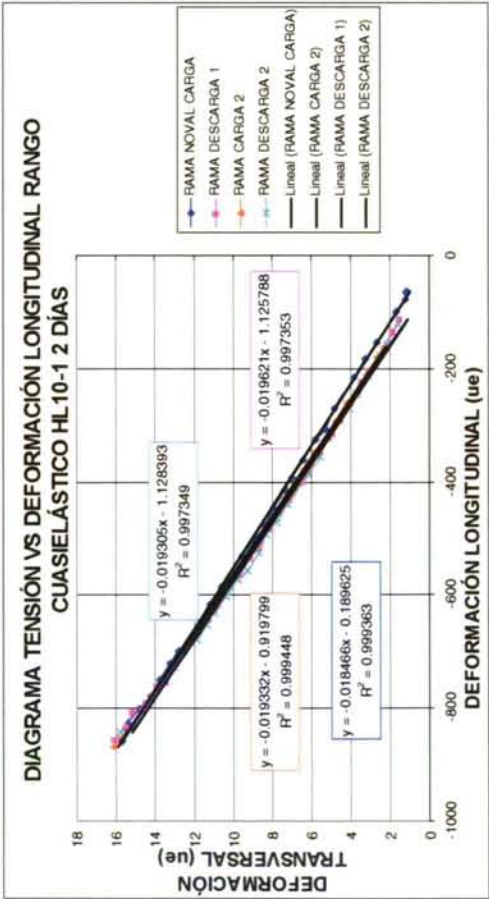




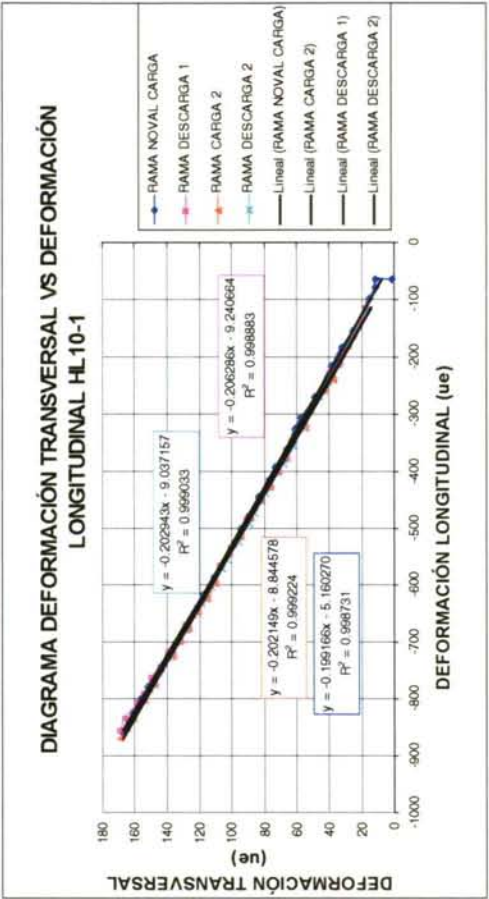
Gráfica 4.3.6.1-5



Gráfica 4.3.6.1-6



Gráfica 4.3.6.1-7



Gráfica 4.3.6.1-8

#### 4.3.6.2. Diagramas de HL10-2 y HC, a los 3 días

En este apartado se exponen los resultados de los ensayos realizados sobre probetas cilíndricas 15×30 de HL10-2 y de HC, instrumentadas con dos bandas longitudinales y dos transversales de 60 mm de longitud, a los tres días del hormigonado. Se aprecia que, en este caso, también el diagrama tensión-deformación longitudinal (Gráfica 4.3.6.2-1) se ajusta a una parábola cúbica. Los valores de tensión máxima registrada y de deformación máxima concomitante son muy similares, ligeramente superiores en el HL10-2. La curva tenso-deformacional del HL10-2 presenta una mayor linealidad hasta valores elevados de carga (el 60% de la carga máxima registrada).

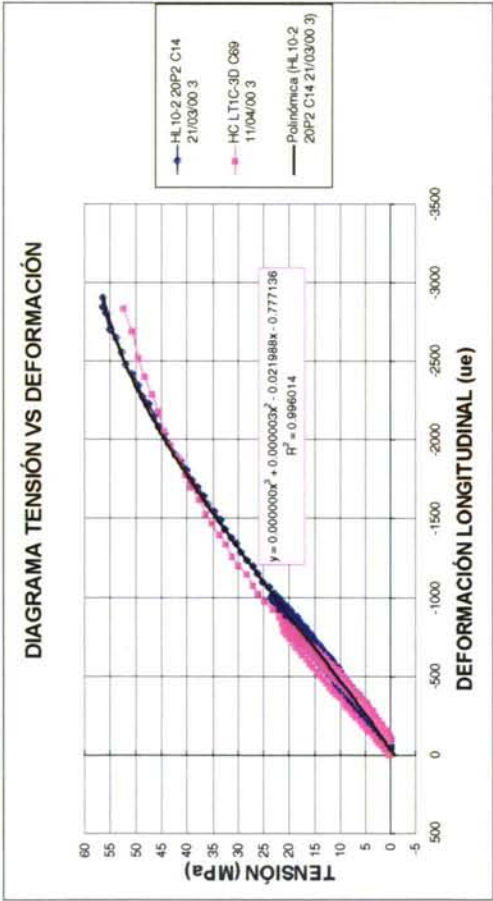
La deformación máxima registrada en ambas probetas fue de aproximadamente -2800 ue para ambos materiales, valor superior en valor absoluto a la deformación máxima habitual en ensayos a compresión simple, de aproximadamente -2000 ue (EHE98, E21395). Creemos que esto es debido a que la longitud de las bandas extensométricas empleadas en estos ensayos es de 60 mm: el valor de la deformación media variará según la longitud instrumentada, debido al efecto de rozamiento de la probeta y los platos de la prensa.

Al, al igual que en el apartado anterior, si analizamos la Gráfica 4.3.6.2-2 se observa una mayor ductilidad transversal del HC, para el que se registran valores de deformación transversal máxima considerablemente más elevados.

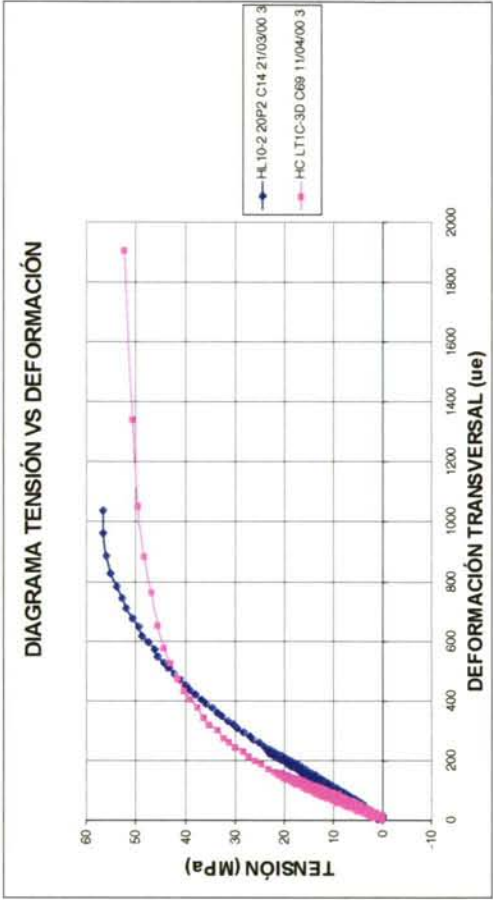
En las Gráficas 4.3.6.2-3 y 4.3.6.2-4, se aprecia el comportamiento del módulo de Poisson a lo largo del ensayo. Se observa que el valor del mismo se mantiene sensiblemente constante, de -0.18 para el HC hasta el 40 % de la carga máxima registrada, y de -0.23 para el HL10-2, valor que se mantiene aproximadamente constante hasta al 50% de la carga máxima registrada. A partir de ese punto el valor del módulo aumenta en valor absoluto de manera más acusada para el HC, hasta la rotura.

Las Gráficas 4.3.6.2-5 a 4.3.6.2-8 exhiben los valores de los módulos de deformación longitudinal y módulo de Poisson correspondientes a las ramas de carga y descarga de los ciclos del ensayo de módulo. Se aprecia que el módulo de deformación longitudinal es muy similar en ambos casos, ligeramente superior para el HC. Los módulos de Poisson son ligeramente superiores para el HL10-2, del orden de 0.25, y sin embargo para el HC el módulo de Poisson es aproximadamente 0.2.

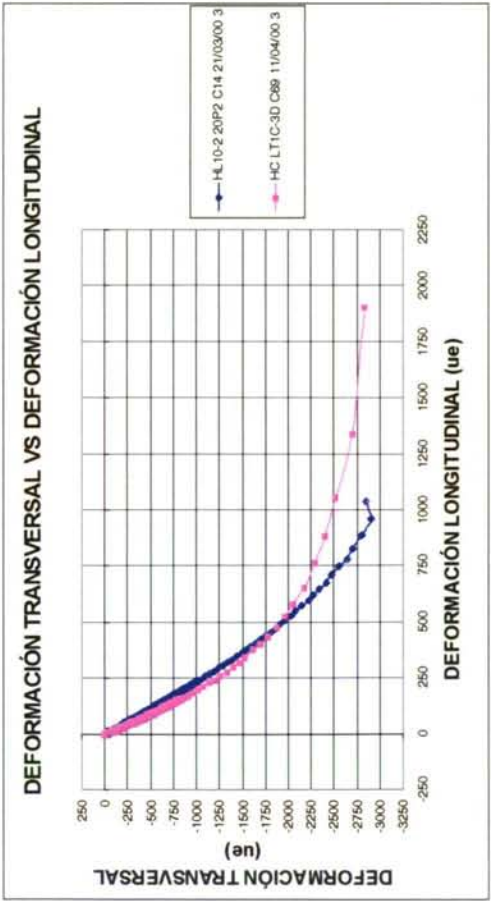




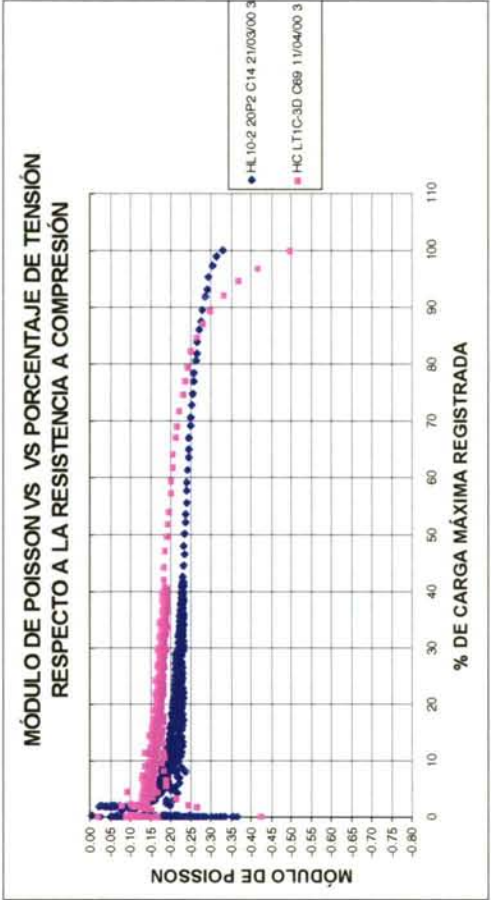
Gráfica 4.3.6.2-1



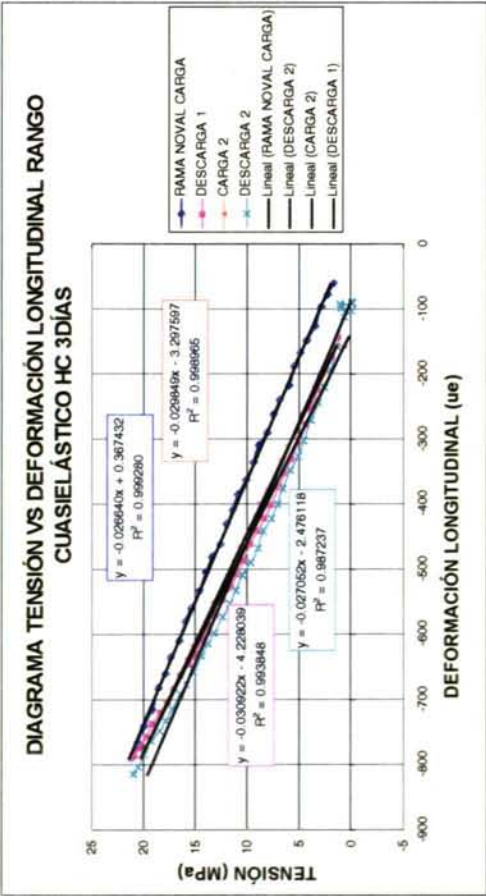
Gráfica 4.3.6.2-2



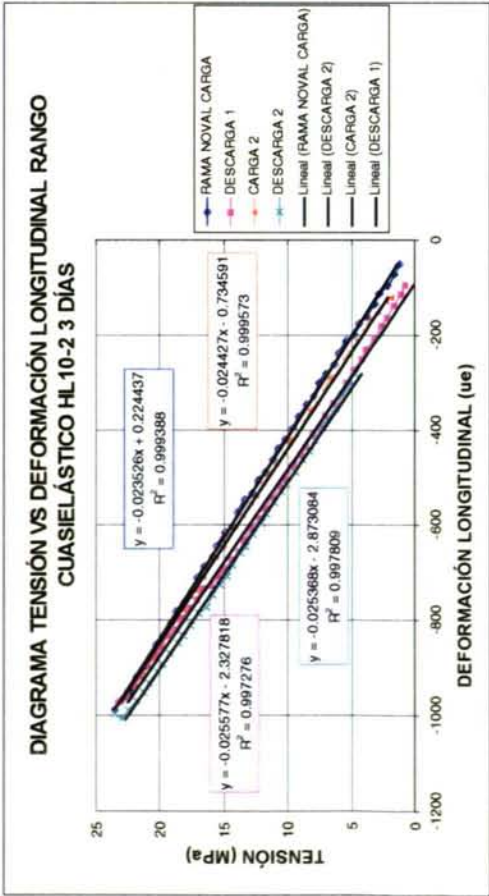
Gráfica 4.3.6.2-3



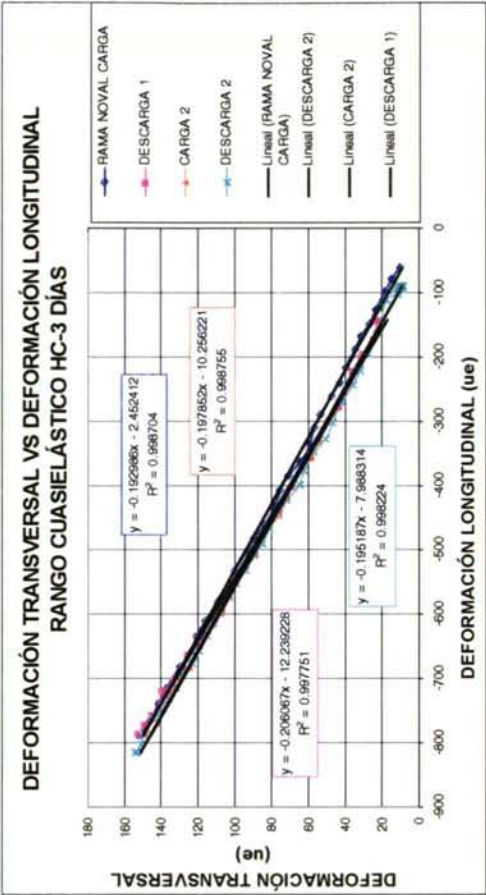
Gráfica 4.3.6.2-4



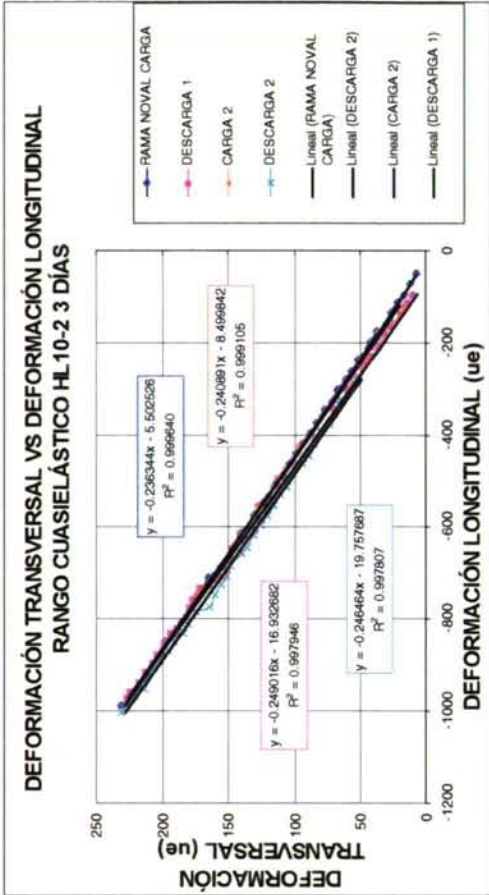
Gráfica 4.3.6.2-5



Gráfica 4.3.6.2-7



Gráfica 4.3.6.2-6



Gráfica 4.3.6.2-8



### 4.3.7. DENSIDAD DEL HORMIGÓN EN MASA Y AHORRO EN PESO

La densidad del hormigón ligero varía según el ambiente a que esté sometido: generalmente se diferencia entre densidad seca, densidad sumergida y densidad en equilibrio (WEIG74). Se define densidad de equilibrio a la densidad que presenta el hormigón ligero en condiciones termohigrométricas habituales (en nuestro caso, el ambiente del laboratorio).

Como se puede apreciar en la Tabla 4.3.7-1, el ahorro en peso propio del hormigón en masa respecto al HC es del 22 al 24% para las dosificaciones HL3-1 y HL10-1. Este ahorro se reduce considerablemente para el caso del hormigón HL10-2 y el HL3-2, en que alcanza tan sólo el 16% para la densidad en equilibrio (WEIG74).

Tabla 4.3.7-1

Resumen densidades				Ahorro respecto a HC	
	Media densidad equilibrio	Desviación densidad equilibrio	Densidad sumergida	% densidad equilibrio	% densidad sumergida
	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	%	%
HC	23.54	0.16	24.02	0.00	0.00
HL10-1	17.77	0.31	18.54	24.49	22.81
HL3-1	17.80	0.19	18.55	24.38	22.76
HL10-2	19.76	0.35		16.03	
HL3-2	19.69			16.36	

### 4.4. ACERO DE PRETENSADO

El cordón de pretensado empleado en todos estos ensayos procede de una misma bobina. Se trata de cordón de pretensado UNE 36094-97 y 1860 S 7 15,2 D, procedente de Trefilerías Quijano S.A., Los Corrales de Buelna, Cantabria, recibido en la fábrica de Outeiro de Rei en junio de 1998 y conservado a resguardo.

Los valores garantizados por el fabricante se reflejan en la Tabla 4.4-1:

Tabla 4.4-1

Características	Notación	Mínimo	Máximo	Unidad
Sección	$A_p$	137.2	142.8	mm
Carga de rotura	$f_{p\text{ máx},k}$	260	304	kN
Límite elástico al 0.1%	$f_{pyk,0.1}$	221		kN
Límite elástico al 0.2%	$f_{pyk}$	229		kN
Alargamiento bajo carga máxima ( $l \geq 500\text{mm}$ )	$\epsilon_{pu}$	3.5		
Módulo elástico	$E_p$	181.4	208.7	GPa
Relajación a 1000 h al 70% C.R. real	$\rho_{1000}$	181.4	208.7	

Las características proporcionadas por el fabricante para esta bobina se presentan en la Tabla 4.4-2:

Tabla 4.4-2

Bobina 1973	Notación	Valor	Unidad
Sección nominal	$A_p$	142.04	mm <sup>2</sup>
Carga rotura	$f_{p \text{ máx},m}$	267.3	kN
Límite elástico 0.1%	$f_{pym,0.1}$	247.3	kN
Límite elástico 0.2%	$f_{pym}$	250.9	kN
Carga al 1%		248.2	kN
Alargamiento bajo carga máxima	$\epsilon_{p \text{ máx},m}$	4.76%	%
Módulo elástico	$E_p$	197.9	GPa

En este apartado (véanse Gráficas 4.4-1 a 4.4-4) se presentan varios diagramas carga-deformación del alambre obtenidos durante el tesado de varios pórticos de ensayo. Se aprecia que, a pesar de que la tensión de tesado supera el límite de proporcionalidad (EHE98), se mantiene una linealidad elevada del diagrama tensión-deformación. Hay que destacar, sin embargo, que los valores de deformación se han obtenido con bandas adheridas a un alambre exterior del cordón de pretensado.

Dado que la directriz del alambre es helicoidal, la deformación del alambre no coincide con la deformación longitudinal del cordón (VALD97).

Haciendo las hipótesis de que la deformación de los alambres y la del cordón presentan una correlación lineal, y suponiendo un trenzado uniforme de los cordones, el autor obtuvo los valores de los módulos de deformación para los alambres externos y el cordón de la Tabla 4.4-3 (VALD97).

Tabla 4.4-3

	Alambre	Cordón
Módulo de deformación	$E_p^* = 2.23E5$	$E_p = 1.932E5$

Lo que equivale a:

$$\epsilon_p = 1.154\epsilon_p^*$$

donde:

$E_p^*$  módulo de deformación longitudinal correspondiente a los alambres exteriores del cordón de pretensado, valor promedio

$E_p$  módulo de deformación longitudinal del cordón de pretensado, valor promedio

$\epsilon_p^*$  deformación longitudinal correspondiente a los alambres exteriores del cordón de pretensado, valor que se mide experimentalmente mediante las galgas de cable (ue)

$\epsilon_p$  deformación longitudinal del cordón de pretensado (ue)

Durante la investigación llevada a cabo se constató en los diversos ensayos una dispersión apreciable en los valores de deformación de los alambres instrumentados respecto a la misma fuerza aplicada en el cordón. Sin embargo, la correlación para cada una de las curvas obtenidas fue alta. Las relaciones obtenidas en nuestro caso durante la



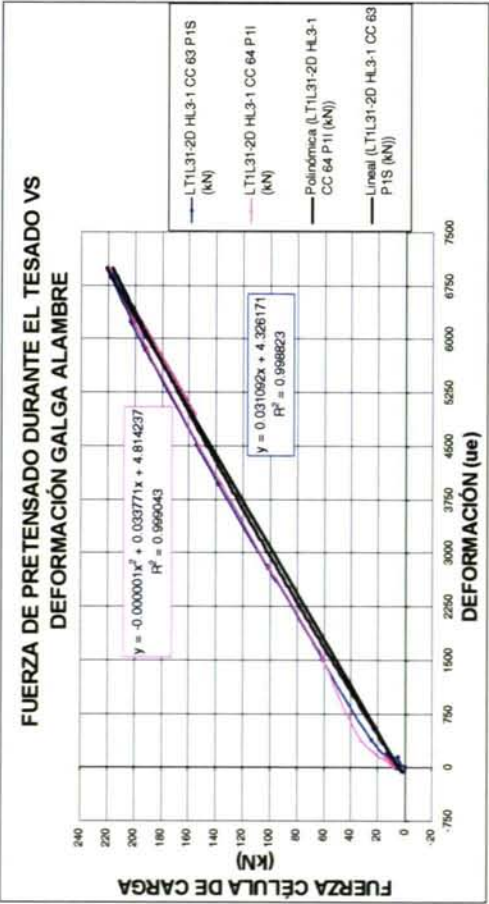
fabricación de la segunda serie de vigas en dos cordones diferentes, para valores de deformación en  $ue$ , fueron:

$$\varepsilon_p = 1.10\varepsilon_p^* + 520 \quad \text{cordón 1, aproximación 1}$$

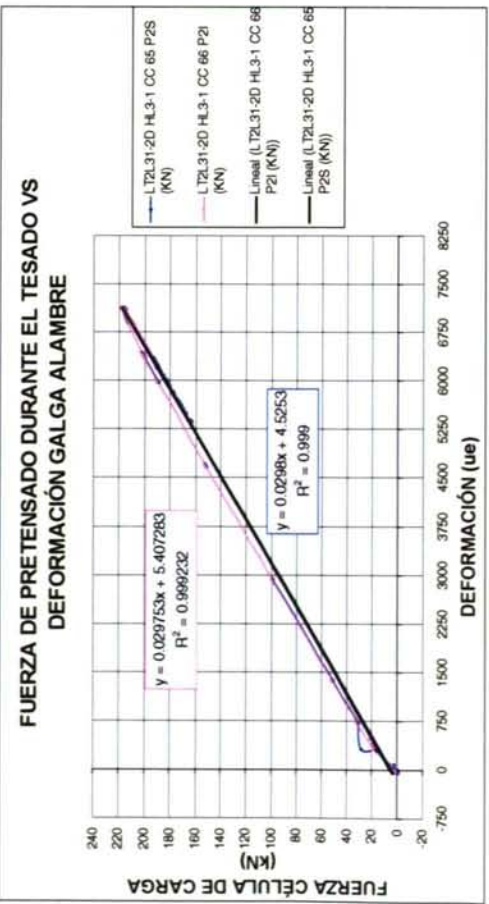
$$\varepsilon_p = 1.08\varepsilon_p^* - 132 \quad \text{cordón 3, aproximación 2}$$

Las relaciones anteriores acotan superior e inferiormente, para un valor dado de deformación del alambre, el valor de deformación del cordón que proporciona la expresión de Valdés (VALD97). La correlación obtenida entre las medidas de alambre y las de cordón durante el tesado fue superior en el caso de la expresión 1, expresión que emplearemos preferentemente en este trabajo.

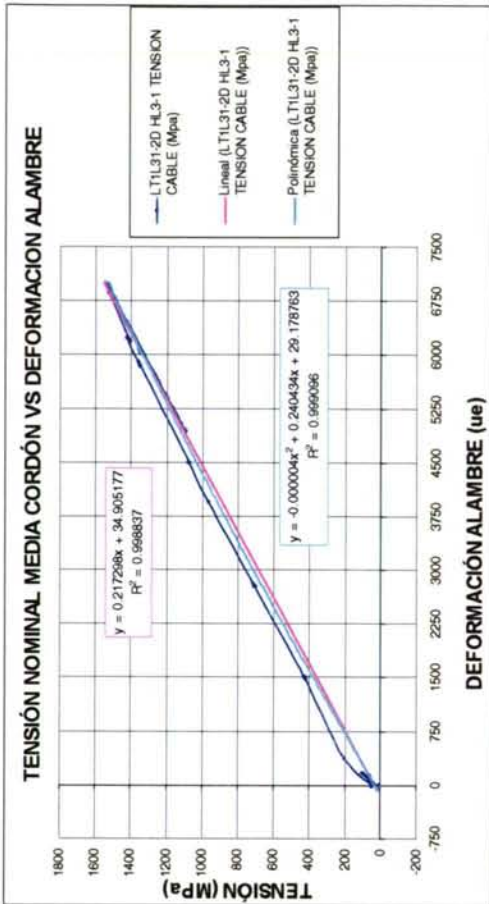
Los valores de ordenada en el origen de las expresiones deducidas experimentalmente no tienen sentido físico, se deben a la variación del “cero” de las galgas debida a las oscilaciones térmicas producidas desde la puesta a cero de las bandas y el tesado. Por lo que respecta a la pendiente de las aproximaciones 1 y 2, los valores son similares a la pendiente de la expresión deducida por Valdés.



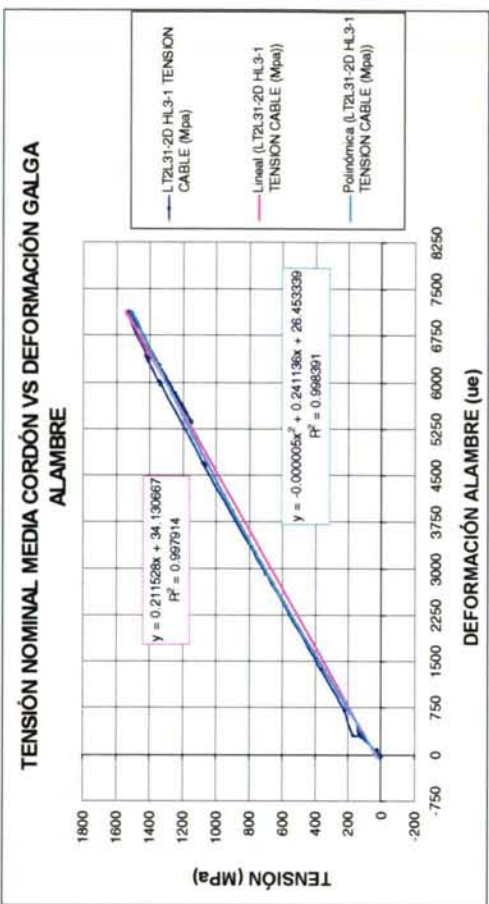
Gráfica 4.4-1



Gráfica 4.4-3



Gráfica 4.4-2



Gráfica 4.4-4





## *Capítulo 5*

# **DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE ADHERENCIA SOBRE PROBETA O ENSAYOS DE PÓRTICO**

### **5.1. INTRODUCCIÓN**

En el Apartado 2.4.1 se abordó el resumen de diversas investigaciones previas acerca de la adherencia del hormigón pretensado en probeta, en lo que denominaremos también ensayos de pórtico. Con este tipo de ensayo a escala se busca la caracterización de las propiedades adherentes del conjunto hormigón-pretensado de una forma representativa, sistemática, sencilla y económica.

Los ensayos de pórtico se pueden clasificar en dos tipos:

- Ensayos realizados sobre la armadura sin tensión previa. Estos ensayos son de tipo “pull-out”. Actualmente el más extendido es el ensayo de Moustafa (PCI96a y PCI96b).
- Ensayos realizados sobre la armadura previamente tesada (DENU91, ABRI93, ROSE97). Para ello es necesario un bastidor o pórtico de ensayo. Se pueden clasificar en ensayos “pull-out” y ensayos “push-in”, según se aumente la tracción del pretensado o se simule la transferencia del mismo en un extremo de la probeta. Para mantener el equilibrio es necesario el apoyo de la probeta en una placa rígida del bastidor.

El hormigonado de las probetas se puede realizar con el cordón de pretensado en posición horizontal (CHON91, ROSE97) o bien en posición vertical (DENU91, ABRI93), lo que favorece las propiedades adherentes.

En este capítulo se describen los ensayos de pórtico realizados en la presente investigación, basados en los ensayos de Abrishami y Mitchell (DENU91, ABRI93). Los dos ensayos planteados tenían como finalidad respectivamente:

- Predecir las tensiones máxima y mínima que se pueden desarrollar en la zona de transmisión de un elemento pretensado, puesto que se simula la transmisión de pretensado.



- Predecir las tensiones máximas y mínimas de adherencia que se pueden desarrollar en servicio en un elemento de hormigón pretensado, en la zona complementaria a tracción, puesto que se simula el aumento de tensión que se produce durante el servicio de un elemento de hormigón pretensado.

Los ensayos descritos se efectúan sobre una probeta cilíndrica de hormigón pretensado.

Las ventajas de los ensayos de pórtico son:

- El control del ensayo se efectúa por deformación, lo que permite analizar el comportamiento adherente post-crítico, tras el deslizamiento generalizado (ABRI93).
- La ejecución es sencilla y barata. La ocupación de espacio es reducida.
- El ensayo permite simular el comportamiento adherente de la zona de transmisión y de la zona complementaria a tracción, en condición de carga gradual.
- El ensayo permite variar los diferentes factores que influyen en la adherencia: tipo de armadura, tensión de tesado, tipo de hormigón, recubrimiento, forma de la probeta, longitud adherente, presencia eventual de armadura pasiva, eventuales sollicitaciones dinámicas,...

Los inconvenientes se basan en que realmente resulta difícil simular las condiciones reales adherentes de los elementos pretensados:

- El hormigonado se realiza con el cordón dispuesto verticalmente, lo que es favorable respecto a la adherencia (según la EHE98 y el CM90).
- La longitud adherente entre hormigón y pretensado influye en la distribución de tensiones de adherencia a lo largo de la longitud adherente, que no tiene porqué coincidir con la distribución de las tensiones de adherencia a lo largo de elementos reales.
- La transferencia se realiza de manera gradual. En muchas fábricas la transferencia de pretensado se realiza de manera súbita, lo que es más desfavorable.
- Los ensayos se realizan con un único cordón de pretensado, cuando en la realidad hay múltiples cordones de pretensado próximos entre sí.

## **5.2. EQUIPOS E INSTRUMENTACIÓN**

Para efectuar los ensayos sobre probeta se dispone de los siguientes equipos:

- Dos pórticos de ensayo (véase Fotografía 5.2-1) convertibles en una bancada de laboratorio autoportante (véase Fotografía 5.2-2), extensible hasta 10 metros añadiendo módulos intermedios. La capacidad del sistema pórticos/bancada es de 100 T con cualquier excentricidad, limitada ésta por la dimensión de las placas de anclaje. Estos equipos se diseñaron específicamente para la realización de estos ensayos. La forma de ajustar o modificar la tensión de pretensado durante el ensayo se realiza mediante un sistema de tuercas, sobre el que se apoya la placa de anclaje de la cuña (véase Fotografía 5.2-3).



*Fotografía 5.2-1: Montaje como pórticos*



*Fotografía 5.2-2: Montaje como bancada de laboratorio*



*Fotografía 5.2-3: Detalle del sistema de tuercas para variar manualmente la tensión del cordón de pretensado*

- Gato alevín de pretensado monocordón, de 20 cm de carrera, de la marca CTT-Stronghold, central hidráulica.
- Sistema de adquisición de datos estático, Desin, con veinte canales extensométricos.
- Los equipos de instrumentación se conectan a una caja de conexiones diseñada por el equipo de la ETSICCP, con dos fuentes de alimentación de 5 voltios (galgas) y 10 voltios (transductores de desplazamiento y células de carga), conectada al sistema de adquisición de datos Desin, a su vez conectado a un PC.
- 4 células de carga huecas, de la marca Sensotec, con 330 kN de capacidad, alimentadas con un voltaje de 10 voltios. Estas células de carga se colocan entre las cuñas de anclaje y la placa de anclaje, en los anclajes superior e inferior de cada pórtico, con objeto de conocer en cada momento del ensayo la fuerza de pretensado superior e inferior a la que está sometido el cordón de pretensado. El acoplamiento de la célula con la cuña de anclaje se hace mediante una pieza diseñada específicamente para encajar perfectamente entre ambas, y de esta forma asegurar la transmisión de la carga centrada a la célula.



- 2 transductores potenciométricos de desplazamiento, de 11.0 mm de recorrido, y uno de 50 mm de recorrido, de la marca Apek, que se sujetan al cable mediante pinzas elásticas y se apoyan en la cara superior de la probeta e inferior de la placa, respectivamente, con objeto de determinar en cada momento del ensayo el deslizamiento relativo del cable respecto a la probeta. El voltaje medio de alimentación de estos potenciómetros resistivos es de 10 voltios.
- Galgas extensométricas de la marca TML tipo PL-60 y PL-90, de 60 o 90 mm de longitud. Estas galgas se utilizaron para medir las deformaciones superficiales del hormigón. El adhesivo utilizado para estas galgas era cianocrilato sobre base de poliéster. La fuente de alimentación de las galgas suministra un voltaje medio de 5 voltios. La forma de conexión de las galgas extensométricas se efectúa en cuarto de puente de Wheatstone, mediante tres hilos, con el fin de compensar las pérdidas debidas a la longitud de cable de conexión.
- Galgas extensométricas de la marca MM, modelo EA-125BT-120, que se adhieren con cianocrilato a un alambre del cordón, tras un proceso de preparación de la superficie descrito, con objeto de determinar la deformación del alambre durante los ensayos. La fuente de alimentación de las galgas suministra un voltaje de 5 voltios. La forma de conexión de las galgas extensométricas es en cuarto de puente de Wheatstone, mediante tres hilos, con el fin de compensar las pérdidas debidas a la longitud de cable de conexión.

### 5.3. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

Los ensayos planteados consisten en el hormigonado de una probeta cilíndrica de hormigón alrededor de un cordón de pretensado que previamente se ha tesado y anclado contra el pósito de ensayo (Figura 5.3-1).

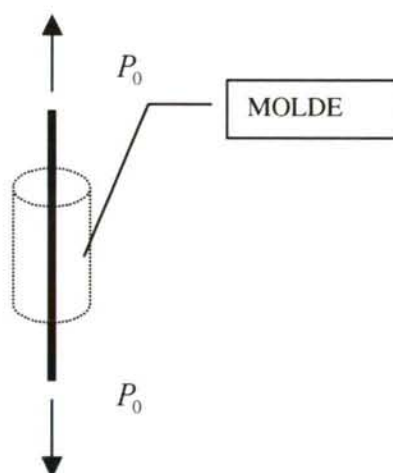


Figura 5.3-1

El tesado del cordón de pretensado de cada uno de los dos pórticos se realiza desde la parte superior con un gato de pretensado monocordón Stronghold de 20 centímetros de carrera, suspendido de un polipasto.

La tensión de tesado inicial adoptada es la máxima permitida por la normativa española (EHE98) de forma transitoria, en nuestro caso limita el valor  $0.85 f_{pmáx,k}$ . Esta tensión está referida a los resultados de los ensayos efectuados por el fabricante en una muestra del rollo al que pertenece todo el cordón empleado en este trabajo.

Dada la corta longitud del cable las pérdidas de penetración de cuña son muy acusadas, de varias toneladas. La recuperación de carga hasta la fuerza de pretensado deseada,  $P_0$ , se realiza de forma manual mediante el sistema de tuercas del pórtico diseñado, accionándolas mediante una llave de gran brazo (2 metros aproximadamente).

El control de la carga de tesado se efectúa simultáneamente mediante las células de carga, el manómetro del gato y la galga adherida al cable. Esta última permite detectar la rotura fortuita de algún alambre, hecho que conduciría a una pérdida de rigidez del resto de los alambres, y así permitiría detectar valores de tensión elevados.

Una vez alcanzada la carga en el cable deseada,  $P_0$ , cuyo valor depende del tipo de ensayo, se procede a hormigonar una probeta concéntrica al cordón de pretensado. El apoyo de la probeta en la placa rígida solidaria al pórtico se hace mediante la base del molde, que cuenta con un orificio central de paso del cordón de pretensado. Entre esta base y la placa rígida se extiende desencofrante, para minimizar el posible rozamiento entre ambas placas de acero.

En nuestro caso se adoptó inicialmente una probeta cilíndrica de 15×30 cm, al igual que Abrishami-Mitchell (ABRI93) si bien se dejó abierta la modificación del diámetro y/o la longitud adherente de la probeta, para simular con mayor precisión las condiciones reales. En ensayos posteriores se planteó la reducción del tamaño de la probeta cilíndrica a 10×30 cm, para igualar el recubrimiento al adoptado en fábrica. También se dispuso una placa de apoyo de teflón como base del molde para reducir el rozamiento probeta-base. Los ensayos realizados con este sistema fueron fallidos y se descartaron, debido a que se indujo fisuración por hendimiento a las probetas: bajo la compresión, el teflón experimentó un aumento de temperatura cuya consecuencia fue la aparición de deformaciones plásticas considerables, del orden de décimas de milímetros en sentido radial. La variación del diámetro de la probeta y de las condiciones de apoyo de la misma son vías de investigación que a nuestro juicio presentan un gran interés.

Para la realización de cada ensayo de pórtico se realizaba una amasada de 45 litros en el Laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la ETSICCP. Simultáneamente a la fabricación de la probeta del pórtico se confeccionaban las probetas de acompañamiento, cúbicas y cilíndricas, para la determinación de las propiedades resistentes a la edad de ensayo, y probetas de retracción (una cilíndrica y otra prismática, según lo visto en el Capítulo 4). Las probetas de acompañamiento se conservaban hasta su ensayo en las mismas condiciones que las probetas de los pórticos. Transcurridas 20 horas desde el hormigonado, tras un proceso de curado húmedo con telas mojadas y lámina de polietileno, se desmoldaba la probeta de cada pórtico y, simultáneamente las probetas de acompañamiento.

A continuación se describen los procesos específicos de cada tipo de ensayo:

- Ensayo de simulación del comportamiento adherente en la zona de transmisión.
- Ensayo de simulación del comportamiento adherente en la zona de la zona complementaria a tracción.



### 5.3.1. ENSAYO DE SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ADHERENTE EN LA ZONA DE TRANSMISIÓN

En este ensayo se simula la transmisión de la fuerza de pretensado, reduciendo paulatinamente la tensión en el extremo superior del cordón de pretensado mediante el sistema de tuercas de la Fotografía 5.2-3. Se trata de un ensayo de tipo “push-in” (DENU91, ABRI96).

Mediante este ensayo se simula la transmisión de la fuerza de pretensado, siguiendo el proceso siguiente:

1. Se tesa el cordón de pretensado de cada uno de los dos pórticos de ensayo hasta alcanzar finalmente una fuerza  $P_0$  correspondiente al máximo de tensión admitida por la normativa española de forma permanente (EHE98), en nuestro caso limita  $0.75 f_{pmáx,k}$ .
2. Se hormigona una probeta cilíndrica normalizada 15×30 concéntrica al cordón de pretensado vertical. Se confeccionan las probetas de acompañamiento que, sometidas a las mismas condiciones ambientales permiten evaluar las características de la probeta ensayada.
3. Se cura el hormigón de la probeta durante las 20 horas siguientes al final de amasado, momento en que se desmolda. Las probetas de acompañamiento (para determinar retracción, resistencias, módulo de deformación) se someten al mismo ambiente y operaciones que la probeta del pórtico.
4. El inicio de ensayo se efectúa en todos los casos a la edad de transferencia prevista (48 o 72 horas, dependiendo de la edad de transferencia de las vigas que se pretenden simular) desde el final de amasado. La fuerza de pretensado del extremo superior se hace disminuir ajustando las vueltas de tuerca para conseguir escalones de 3-5 kN. La disminución de carga es gradual. La diferencia de tensión a que queda sometido el pretensado es equilibrada por la reacción de la placa de apoyo de la probeta, que origina una compresión de la probeta de  $\Delta P_t$  (véase la Figura 5.3.1-1, notación en Apartado 2.4.1.4).
5. Este proceso de reducción de la carga de la parte superior del cordón se repite sucesivamente hasta que se produce el fallo por adherencia, o se transfiere la totalidad de la fuerza de pretensado  $P_0$  a la probeta.
6. Simultáneamente se ensayan las probetas de acompañamiento en el Laboratorio de la ETSICCP de La Coruña, y en el Laboratorio de Cementos Cosmos en Oural.

Durante este proceso se controlaban los siguientes parámetros:

- Tensión en la parte superior e inferior del pretensado mediante células de carga huecas.
- Deslizamiento relativo del cordón de pretensado respecto a las caras superior e inferior de la probeta, mediante transductores de desplazamiento.
- Deformación de uno de los alambres de la parte superior del cordón de pretensado, como medida redundante de control de tensión.

- Control del centrado de la probeta y determinación de la deformación longitudinal y transversal del hormigón de la superficie lateral de la probeta, mediante varias galgas horizontales y verticales dispuestas simétricamente respecto al eje de la probeta.

En nuestro caso, en que el ensayo se realiza sobre probetas de hormigón de altas prestaciones, a las 48 o 72 horas del hormigonado, en todos los casos se produjo el deslizamiento generalizado a lo largo de la probeta antes que se anulase la fuerza superior. A pesar de ello, se continuó el ensayo hasta anular la carga superior, a fin de evaluar la capacidad adherente residual.

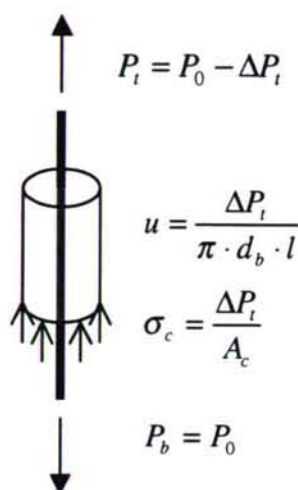


Figura 5.3.1-1

A través de este ensayo se pretende simular la transmisión de pretensado en elementos pretensados de armadura pretesa.

### 5.3.2. ENSAYO DE SIMULACIÓN DE COMPORTAMIENTO ADHERENTE EN LA ZONA COMPLEMENTARIA A TRACCIÓN

Este ensayo pretende simular las condiciones de trabajo del cordón de pretensado de una viga pretensada con armadura pretesa, a lo largo de la zona complementaria a tracción. Se trata de un ensayo de arrancamiento ("pull-out test"), en el que se va aumentando paulatinamente la tensión en el extremo inferior del cordón de pretensado, mediante el sistema de tuercas de la Fotografía 5.2-3.

1. Se tesa el cordón de pretensado de cada uno de los dos pórticos de ensayo hasta alcanzar finalmente una fuerza  $P$ , que definimos a continuación. Este ensayo pretende representar la fuerza de pretensado después de producidas las pérdidas de pretensado instantáneas y diferidas a una edad  $t$ ,  $P = P(t) = \alpha P_0 = P_0 - \Delta P_i - \Delta P_{dif}(t)$ . Se adopta un valor de  $\alpha = 0.75$ , lo que implica simular unas pérdidas de pretensado hasta la edad de ensayo del 20% respecto a la de una hipotética fuerza de pretensado inicial, correspondiente a  $0.75 f_{p\max,k}$ , valor máximo permitido por la EHE (EHE98) de forma permanente, en nuestro caso.



2. Se hormigona una probeta cilíndrica normalizada 15×30 cm centrada en torno al cordón de pretensado vertical. Se confeccionan las probetas de acompañamiento que, sometidas a las mismas condiciones ambientales permiten evaluar las características de la probeta ensayada.
3. Se cura el hormigón de la probeta durante las 24 horas siguientes al final de amasado, momento en que se desmolda. Las probetas de acompañamiento (para determinar retracción, resistencias, módulos) se someten al mismo ambiente y operaciones que la probeta del pórtico.
4. El inicio de ensayo se fijó en todos los casos a la edad de transferencia prevista (48/72 horas) desde el final de amasado, que representa una cota inferior de la edad de puesta en carga de la estructura y, por lo tanto, es más desfavorable. La fuerza de pretensado del extremo inferior aumenta inicialmente a escalones de 3-5 kN. Realmente, como el control del ensayo se hace por deformación constante los escalones de carga van disminuyendo a partir del límite de proporcionalidad del pretensado (EHE98). La diferencia de tensión a que queda sometido el pretensado es equilibrada por la reacción de la placa de apoyo de la probeta, que origina una compresión de la probeta de  $\Delta P_b$  (véase la Figura 5.3.2-1, y la notación en Apartado 2.4.1.4).
5. El aumento de la carga aplicada,  $\Delta P_b$  se continúa hasta que se produce el fallo por adherencia, o se alcanza el valor del límite elástico del cordón de pretensado garantizado por el fabricante.
6. Simultáneamente se ensayan las probetas de acompañamiento en el Laboratorio de la ETSICCP de La Coruña, y en el Laboratorio de Cementos Cosmos en Oural.

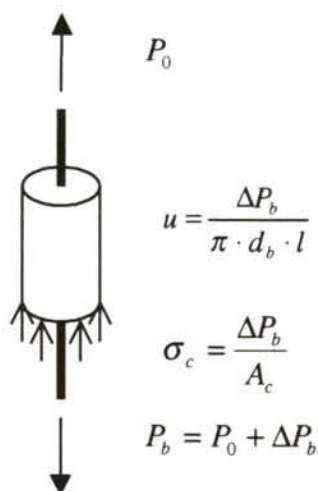


Figura 5.3.2-1

Aún habiéndose producido deslizamiento generalizado a lo largo de la probeta, se continúa aplicando tensión a la parte inferior del cordón, a fin de evaluar la capacidad adherente remanente en servicio.

A través de este ensayo se pretende extrapolar la longitud de anclaje básica de pretensado en elementos pretensados de armadura pretesa.

## 5.4. VALORACIÓN CRÍTICA DE LOS ENSAYOS DESCRITOS EN EL PRESENTE TRABAJO

Para poder extrapolar los resultados obtenidos en estos ensayos, estos han de ser representativos de las condiciones de trabajo reales. En este apartado se hace una valoración crítica de estos ensayos:

- Los ensayos descritos son sencillos, rápidos y con las adecuadas medidas de seguridad descritas en el Anexo 2, muy seguros. Los procedimientos de los ensayos descritos permiten cerrar el ciclo de dos ensayos en una semana.
- El hormigonado de la probeta se realiza con el cordón de pretensado vertical, en posición favorable respecto a la adherencia (EHE98, CM90), lo que raramente sucede en la práctica. De hecho se ha detectado un efecto de drenaje del pretensado: el cordón desagua una cantidad de agua entre 5 y 10 gramos, por lo que se elimina agua de amasado, lo que también favorece la adherencia.
- Tras el proceso de hormigonado y curado, a una determinada edad, en nuestro caso de 2 o 3 días (coincidiendo con la edad de transferencia, que representa una cota inferior de la edad de puesta en carga, suponiendo que se ha alcanzado la resistencia de proyecto) se procede a realizar el ensayo. Realmente, para el ensayo de simulación de la zona complementaria a tracción, la edad de ensayo debería corresponder a la edad en que de puesta en carga de la estructura. La puesta en servicio se podrá producir cuando las características resistentes del hormigón al menos cumplan las limitaciones de la normativa (EHE98). Esta edad tiende a disminuir en el caso de vigas prefabricadas, por ser el ahorro en plazo una de las principales ventajas de este tipo de estructura. Además, la adopción de una edad de ensayo menor que la edad de puesta en carga es favorable de cara al ensayo porque:
  - Se trata de buscar un ensayo rápido y barato para evaluar las propiedades adherentes de un hormigón, por lo que interesa efectuar el ensayo lo antes posible.
  - Los hormigones estudiados son de endurecimiento rápido, por lo que a la edad de ensayo adoptada sus características resistentes rondan el 80-90% de las de proyecto (véase el Capítulo 4). Si se quiere estudiar otro tipo de hormigones, para decidir la edad de ensayo habría que estudiar previamente la evolución de resistencias con la edad.
- La placa de apoyo de la probeta, aunque muy rígida, sufre una cierta flexión debida a la carga que le transmite la probeta, por lo que se produce una variación de la tensión de la parte de cordón no ensayada (inferior en el ensayo de transmisión, superior en el ensayo de simulación del comportamiento en servicio). Este hecho no tiene relevancia, siempre y cuando, como en nuestro caso, se haya instrumentado la fuerza en los anclajes superior e inferior.
- Las dimensiones de la probeta adoptadas para estos ensayos son las correspondientes a la probeta cilíndrica normalizada. Por lo tanto, el recubrimiento del pretensado es superior al recubrimiento de la práctica. De todas formas, en las vigas comerciales, en la zona de anclaje existe una cuantía apreciable de armadura transversal, que tiene un efecto de confinamiento apreciable.





UNIVERSIDAD DE LA CORUÑA  
E.T.S. INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS  
Departamento de Tecnología de la Construcción



**ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES  
DE ADHERENCIA DE CORDONES DE PRETENSADO  
EN ELEMENTOS PREFABRICADOS DE HORMIGONES  
DE ALTAS PRESTACIONES INICIALES**

*Trabajo realizado como requisito para obtener el grado de  
Doctor, por:*

***Cristina Vázquez Herrero***

*Directores:*

***Fernando Martínez Abella  
Manuel Casteleiro Maldonado***

*A Coruña, Diciembre de 2000*





## Capítulo 6

# ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ADHERENCIA SOBRE PROBETA

### 6.1. INTRODUCCIÓN

En el presente Capítulo se describen los resultados de los siguientes ensayos:

- Ensayo de pórtico de simulación de la zona de transmisión sobre probeta (que denominaremos abreviadamente ensayo de pórtico LT o pórtico de transmisión).
- Ensayo de pórtico de simulación de la zona complementaria a tracción sobre probeta (que denominaremos abreviadamente ensayo de pórtico LC).

En la Tabla 6.1-1 aparecen los ensayos realizados, cuyos resultados se exponen a continuación (véase la nomenclatura en el Capítulo 3).

En la Figura 6.1-1 se presenta un esquema de la instrumentación empleada en cada pórtico.

Tabla 6.1-1

Tipo de ensayo	Material	Edad de ensayo (días)	Ensayo pórtico 1	Ensayo pórtico 2
Zona de transmisión	HC	2	LT1C-2D	LT2C-2D
	HL10-1	2	LT1L101-2D	LT2L101-2D
	HL3-1	2	LT131-2D	LT231-2D
	HC	3	LT1C-3D	LT2C-3D
	HL10-2	3	LT1L102-3D	LT2L102-3D
Zona complementaria a tracción	HC	2	LC1C-2D	LC2C-2D
	HL10-1	2	LC1L101-2D	LC2L101-2D
	HL3-1	2	LC131-2D	LC231-2D
	HC	3	LC1C-3D	LC2C-3D
	HL10-2	3	LC1L102-3D	LC2L102-3D

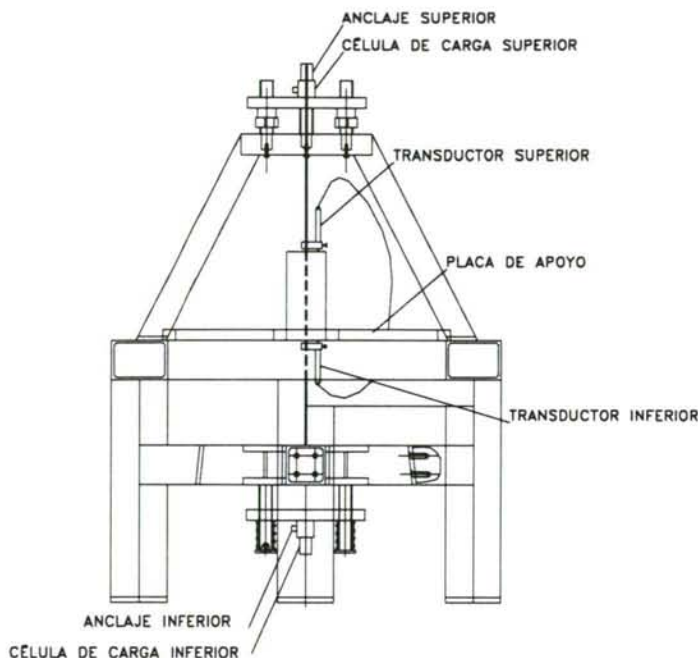


Figura 6.1-1

En esta investigación se denomina fuerza unitaria de adherencia (F.U.A.) a la diferencia de fuerza en el cordón, entre la parte inferior y superior de la probeta, dividida entre la longitud adherente (en nuestro caso, la longitud total de la probeta).

La F.U.A. constituye una medida de la capacidad adherente del cordón y el hormigón: proporciona una estimación del crecimiento de la fuerza de pretensado, a lo largo de la zona de transmisión (F.U.A. obtenida del ensayo de pórtico LT) o de la zona complementaria a tracción (F.U.A. del ensayo de pórtico LC).

La tensión de adherencia media se determina dividiendo la F.U.A. entre el perímetro de contacto entre el cordón y el hormigón. Realmente la superficie de contacto entre ambos materiales es difícilmente cuantificable, debido a que el paso de hélice de los alambres del cordón de pretensado es variable (UNE 36098/3). Podemos considerar el perímetro nominal  $\pi d_b$ , deducido a partir del diámetro nominal del cordón,  $d_b$ : este valor es el adoptado por diversos autores, para comparar las capacidades adherentes de cordones de diferentes diámetros. Por otra parte, la FHWA estima que el perímetro real de un cordón de pretensado de siete alambres es de aproximadamente  $\frac{4}{3}\pi d_b$  (FHWA94).

En el presente trabajo el diámetro del cordón es fijo, por lo que todas las gráficas se refieren a la F.U.A. Sin embargo, en el resumen de resultados de cada pórtico se proporcionan los valores de tensión aparente de adherencia de cada ensayo, referida al diámetro nominal, a fin de comparar estos resultados con los de otros investigadores.

En el criterio de signos adoptado en este capítulo, las fuerzas y deformaciones de compresión son positivas. Por ello los deslizamientos hacia el interior del hormigón son positivos (deslizamiento de la parte superior de la probeta), y los contrarios son negativos (deslizamiento de la parte inferior de la probeta).



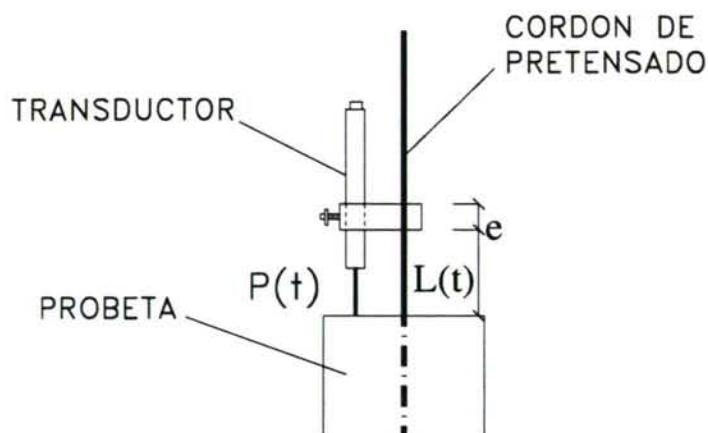


Figura 6.1-2

La variación de longitud de la zona instrumentada, entre un instante  $t_0$  y un instante  $t$  se compone de dos sumandos:

- Penetración del cordón en la base de hormigón.
- Variación de longitud experimentada por el cordón debido a la variación de tensión.

El término que nos interesa, el deslizamiento  $\delta$ , se determina de la siguiente forma (véase la Figura 6.1-2):

$$\delta(t) + \frac{P(t)L(t) - P(t_0)L(t_0)}{A_p E_p} = L(t) - L(t_0) \Rightarrow \delta(t) = L(t) - L(t_0) - \frac{P(t)L(t) - P(t_0)L(t_0)}{A_p E_p}$$

donde:

- $e$  espesor de la pinza de sujeción de los transductores
- $t$  instante genérico del ensayo
- $\delta(t)$  deslizamiento relativo entre hormigón-acero, en el instante  $t$
- $E_p$  módulo de deformación longitudinal medio del pretensado
- $t_0$  instante inicial del ensayo
- $P(t_0)$  tracción en el cordón a la edad de inicio del ensayo
- $P(t)$  tracción en el cordón en el instante  $t$
- $L(t_0)$  longitud base al inicio del ensayo
- $L(t)$  longitud base en un instante genérico del ensayo,  $t$
- $z(t_0)$  lectura del transductor de desplazamiento durante el inicio del ensayo (mm, positiva a compresión)
- $z(t)$  lectura del transductor de desplazamiento durante un instante genérico del ensayo (mm, positiva a compresión)
- $A_p$  área del cordón de pretensado

Es decir, a la variación de longitud habrá que descontarle la elongación debida a la variación de tensión, para obtener el deslizamiento (WEER91, UNE82).

No es posible conocer los valores exactos de  $L(t)$  y de  $L(0)$ , debido a que la pinza posee un espesor considerable, de 20 mm, para conseguir el máximo paralelismo entre el transductor y el cordón de pretensado. El margen de variación de  $L(t)$  y de  $L(0)$  es

el espesor de la pinza. Esta incertidumbre se tiene en cuenta acotando los deslizamientos, entre un valor máximo y mínimo, tal como aparece en las Tablas 6.1-2 y 6.1-3:

Tabla 6.1-2

<b>Corrección máxima</b>	$L(t_0)^{MAX} = d + e$	$L(t)^{MAX} = d + e - (z(t) - z(t_0))$
<b>Corrección mínima</b>	$L(t_0)^{MIN} = d$	$L(t)^{MIN} = d - (z(t) - z(t_0))$

Tabla 6.1-3

Valor	$L(t_0)$	$L(t)$	$\delta$	Deslizamiento
<b>Corr. máxima</b>	$L(t_0)^{MAX}$	$L(t)^{MAX}$	$\delta_1(t)$	$\delta^{MAX}(t) = \text{máx} / \delta_1(t), \delta_2(t) /$
<b>Corr. mínima</b>	$L(t_0)^{MIN}$	$L(t)^{MIN}$	$\delta_2(t)$	$\delta^{MIN}(t) = \text{mín} / \delta_1(t), \delta_2(t) /$

donde:

- $\delta^{MAX}(t)$  cota superior del deslizamiento relativo hormigón/cordón en un instante genérico del ensayo
- $\delta^{MIN}(t)$  cota inferior del deslizamiento relativo hormigón/cordón en un instante genérico del ensayo

En los ensayos de pórtico se busca la obtención de la F.U.A. máxima previa al deslizamiento generalizado en la probeta, la fuerza unitaria máxima a lo largo de todo el ensayo, y la fuerza unitaria de adherencia mínima (relacionada con la capacidad adherente residual tras haberse producido el deslizamiento generalizado del pretensado).

En cada ensayo se obtendrán los valores de la F.U.A de la Tabla 6.1-4, con la nomenclatura que se detalla en la Tabla 6.1-5, donde:

- $MAT$  material ensayado (HC, HL3-1, HL10-1, HL10-2)
- $e$  edad de ensayo en días (2, 3)
- $\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]$  fuerza unitaria adherente (F.U.A.)
- $\delta^{MAX}(t)$  cota superior del deslizamiento generalizado en la probeta
- $\delta^{MIN}(t)$  cota inferior del deslizamiento generalizado en la probeta
- $\tau_b^*$  tensión de adherencia estimada a partir del perímetro nominal del cordón de pretensado
- $\tau_b$  tensión de adherencia estimada a partir de un valor del perímetro del cordón igual a  $\frac{4}{3}\pi d_b$  (FHWA94)
- $l_{bpt}(t)$  longitud de transmisión del pretensado a la edad  $t$
- $l_{bpc}(t)$  longitud complementaria a tracción, correspondiente a una tensión del límite elástico garantizado del pretensado a la edad  $t$
- $l_{bpd}(t)$  longitud de anclaje correspondiente a una tensión del límite elástico garantizado del pretensado a la edad  $t$
- $SUP$  subíndice que indica un valor correspondiente a la parte superior de la probeta
- $INF$  subíndice que indica un valor correspondiente a la parte inferior de la probeta
- $MAX$  superíndice que indica la cota superior del deslizamiento



<i>MÍN</i>	superíndice que indica la cota inferior del deslizamiento
<i>EST</i>	superíndice que indica el valor estimado a partir de los ensayos
LT	ensayo de simulación de la zona de transmisión
LC	ensayo de simulación de la zona complementaria a tracción
DIF	valor correspondiente a un ensayo diferido, en el que se mantiene la diferencia de carga alcanzada al final del ensayo durante días o semanas

En este trabajo se denomina deslizamiento generalizado, al instante en que el deslizamiento de la parte de la probeta, opuesta a la zona de variación de la fuerza de pretensado, en valor absoluto, supera el valor de  $0.02^{6.1}$  mm (véase la Tabla 6.1-4). El deslizamiento generalizado viene definido por el deslizamiento inferior, para el ensayo LT. En el ensayo LC, el deslizamiento generalizado está condicionado al valor del deslizamiento inferior.

Tabla 6.1-4: Definición de deslizamiento generalizado

Antes deslizamiento generalizado	Después deslizamiento generalizado
AD	DD
$ \delta  \leq 0.02$	$ \delta  > 0.02$

En este trabajo se denomina “pull-out” a los deslizamientos generalizados que se producen de manera brusca, acompañado generalmente de un sonido metálico. Este fenómeno se caracteriza por un deslizamiento concentrado, es decir, una discontinuidad en el deslizamiento. Es una forma brusca de liberar energía, puesto que lleva aparejado una disminución de la F.U.A.

Cuando el deslizamiento se produzca de una forma continua hablaremos de deslizamiento generalizado gradual o progresivo.

Tabla 6.1-5: Valores de la F.U.A. obtenidos a partir de los ensayos

Ensayo	F.U.A. máxima antes deslizamiento	F.U.A. máxima	F.U.A. mínima después del deslizamiento generalizado	F.U.A. mínima diferida después del deslizamiento generalizado
Ensayo pórtico LT	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,e,máx,AD}$	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,e,máx}$	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,e,mín,DD}$	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,e,mín,DD,DIF}$
Ensayo pórtico LC	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LC,e,máx,AD}$	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LC,e,máx}$	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LC,e,mín,DD}$	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LC,e,mín,DD,DIF}$

Si suponemos que el gradiente de la fuerza de pretensado es constante dentro de cada zona diferenciada de la longitud de anclaje (DENU91, CM90) tendremos un comportamiento bilineal de la fuerza de pretensado a lo largo de la longitud de anclaje. Conocidas los valores de la F.U.A. en las zonas de transmisión y complementaria a tracción (véase la Figura 1.2-2):

<sup>6.1</sup> Otros investigadores, como Tilantera y Rechartt (TILA77), adoptan el límite de 0.025 mm. En nuestro caso adoptamos 0.02, por ser el valor de la precisión aproximada de nuestros transductores.

$$l_{bpd}(t) = l_{bpt}(t) + l_{bbc}(t) = \frac{P(t)}{\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,t}} + \frac{A_p f_{py,d} - P(t)}{\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LC,t}}$$

donde:

$l_{bpt}(t)$	longitud de transmisión, a la edad $t$
$l_{bbc}(t)$	longitud complementaria a tracción, a la edad $t$
$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,t}$	F.U.A. de pretensado a lo largo de la zona de transmisión a la edad $t$
$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LC,t}$	F.U.A. de pretensado a lo largo de la zona complementaria a tracción a la edad $t$
$P(t)$	fuerza de pretensado transferida a la zona central de la viga a la edad de evaluación $t$ . Este valor se obtiene descontando a la fuerza de pretensado tras pérdidas instantáneas, $P_3$ , las pérdidas diferidas que se hayan producido hasta el instante $t$

Tabla 6.1-6: Nomenclatura empleada

Variable	Superíndice referido a la variable	Material	Zona	Edad ensayo días	Valor correspondiente a F.U.A. Máxima /mínima	Antes deslizamiento /después deslizamiento	Instantáneo /diferido
$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]$		MAT	LT, LC	$e(2,3)$	máx, mín	AD, DD	DIF
$\delta^{MAX}(t)$			LT, LC	$e(2,3)$	máx, mín	AD, DD	
$\delta^{MIN}(t)$			LT, LC	$e(2,3)$	máx, mín	AD, DD	
$l_{bpt}$	EST				máx, mín		
$l_{bpc}$					máx, mín		
$\tau_b^*$					máx, mín	AD, DD	DIF
$\tau_b$					máx, mín	AD, DD	DIF

## 6.2. ENSAYO DE SIMULACIÓN DE COMPORTAMIENTO ADHERENTE EN LA ZONA DE TRANSMISIÓN

### 6.2.1. INTRODUCCIÓN

Según el planteamiento expuesto en el Capítulo 5, este ensayo consiste en disminuir la fuerza de tracción en el cordón de pretensado previamente tesado, en la parte superior de la probeta. La diferencia de carga entre la parte inferior y superior de la probeta se equilibra a través del apoyo de la probeta de hormigón en la placa. Si el apoyo de la probeta fuese infinitamente rígido, mientras no se produjese deslizamiento generalizado del cordón a lo largo de la probeta, la fuerza de tracción del cordón en la parte inferior se mantendría constante. Sólo cuando el deslizamiento fuese generalizado, se detectaría



un descenso de la fuerza en la parte inferior, debido al deslizamiento del cordón en sentido descendente.

En la práctica, la placa de apoyo no es infinitamente rígida. Cuando se disminuye gradualmente la fuerza de pretensado en la parte superior, la probeta se apoya en la placa, transmitiéndole a la misma una fuerza, repartida en la superficie de apoyo de la probeta, igual a  $P_b - P_t$ . Esta fuerza induce una flecha en la placa. Este descenso es el valor que se acorta la parte inferior del cordón, por lo que se registra una disminución de la fuerza inferior del cordón proporcional a la deformación de acortamiento. Esta pérdida de fuerza es considerable, porque la longitud de la parte inferior del cordón es reducida.

Inicialmente se siguió el proceso de ensayo hasta anular la fuerza de pretensado en la parte superior de la probeta, final del ensayo, tras lo cual se soltaba paulatinamente la fuerza de la parte inferior. Al cabo de un tiempo se planteó la duda de si el material sería capaz de mantener la diferencia de carga resultante al final del ensayo, entre la parte inferior y la superior de la probeta, o si se producirían deslizamientos diferidos.

Por ello en los últimos ensayos realizados se decidió mantener la diferencia de carga correspondiente al final del ensayo, hasta que fuese necesario desmontar el ensayo para realizar el siguiente. Realmente esto último no supone trabajo adicional, y puede dar información acerca del comportamiento diferido de los materiales estudiados.

A la hora de analizar el comportamiento adherente diferido, habrá que tener en cuenta la interacción de:

- Los efectos diferidos del hormigón: retracción y fluencia de la probeta. La deformación por fluencia del hormigón es reducida, puesto que la tensión de compresión longitudinal de la probeta no supera los 7 MPa, lo que supone un 13% de la resistencia a compresión. El acortamiento de la probeta por retracción y fluencia producirá una redistribución entre la fuerza superior e inferior del cordón.
- La relajación del pretensado. La longitud del cordón entre cuñas permanece constante (si suponemos que las cuñas no deslizan en el pote). Con el tiempo se producirá una pérdida de la fuerza del cordón generalizada, que se distribuirá entre la parte superior e inferior del cordón dependiendo de la rigidez de la placa.
- Las variaciones de temperatura. El ensayo se realiza en el ambiente del laboratorio.
- El deslizamiento progresivo del cordón dentro de la probeta: tras el deslizamiento generalizado, existirá una tendencia a compensar la fuerza de pretensado superior e inferior a la probeta. Tras el final del ensayo la parte más traccionada es la inferior, por lo que existirá una tendencia del cordón a deslizar en sentido descendente.

## 6.2.2. ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS LT

### 6.2.2.1. Pórticos LT1C-2D y LT2C-2D

En la Tabla 6.2.2.1-1 se especifica el material y la edad de ensayo de ambos pórticos.

Tabla 6.2.2.1-1

Nombre del ensayo	Material	Edad de ensayo (días)
LT1C-2D/LT2C-2D	HC	2

En las Gráficas 6.2.2.1-1 a 6.2.2.1-5 se observa la gran similitud entre el comportamiento de ambos pórticos, para los diferentes parámetros analizados.

En la Gráfica 6.2.2.1-1 se observa el comportamiento de la célula de carga (CC) superior respecto a la célula de carga inferior durante el ensayo. El inicio del ensayo corresponde al punto superior derecho de la curva. Se aprecia que al destesar la zona superior del cordón de pretensado, la célula de carga inferior experimenta un ligero descenso de carga. Se observan dos tramos perfectamente diferenciados, separados por un quiebro, correspondiente al deslizamiento generalizado. En la Gráfica 6.2.2.1-4 se comprueba que el descenso de carga en la parte inferior se produjo incluso antes de haberse producido el deslizamiento generalizado. La causa de esto es la flexión de la placa de apoyo de la probeta, solicitada por una fuerza vertical descendente de  $P_b - P_t$ .

Después del deslizamiento se aprecia un ligero aumento de la fuerza superior. Esto es debido a que la parte inferior del cordón de pretensado tiende a perder carga, transfiriéndola a la zona superior. Para ello el cordón ha de deslizarse en sentido descendente. Cuanto más acusado es ese “salto” más súbito es el deslizamiento (“pull-out”). Tras el deslizamiento generalizado se observa que la curva presenta un gradiente sensiblemente constante debido a la adherencia residual, efecto del rozamiento/adherencia mecánica (la adherencia cero nos llevaría a una recta de pendiente unidad). El final del ensayo corresponde a un valor de la fuerza inferior remanente de 85-90 kN en ambos pórticos.

En la Gráfica 6.2.2.1-2 se observan los ajustes de los diferentes tramos de cada pórtico. Se aprecia la elevada linealidad de ambos tramos. En este ensayo, una vez producido el deslizamiento generalizado, no se detectó ningún “pull-out” posterior.

En la Gráfica 6.2.2.1-3 se aprecia el comportamiento del deslizamiento superior respecto al valor de fuerza correspondiente a la célula de carga superior. Se diferencian dos tramos en la curva. El quiebro coincide con el deslizamiento generalizado.

En la Gráfica 6.2.2.1-4 se presenta la curva análoga a la 6.2.2.1-3, correspondiente a la zona inferior de la viga. Se aprecia la ausencia de deslizamiento del tramo inicial. Alcanzada una fuerza inferior de aproximadamente 170 kN, aumenta el deslizamiento paulatinamente siguiendo un comportamiento sensiblemente lineal respecto a la fuerza inferior.

En la Gráfica 6.2.2.1-5 se presenta el comportamiento del deslizamiento superior respecto al inferior. Se observa que tras el deslizamiento, la curva sigue un comportamiento sensiblemente lineal, con una pendiente superior a la unidad (la variación de deslizamiento superior es ligeramente mayor que la variación de deslizamiento inferior), debido al efecto Hoyer.



En este ensayo, como se puede apreciar en la Gráfica 6.2.2.1-6, se soltó el cordón inferiormente, inmediatamente después de la finalización del ensayo propiamente dicho, que se produce cuando la fuerza superior se anula.

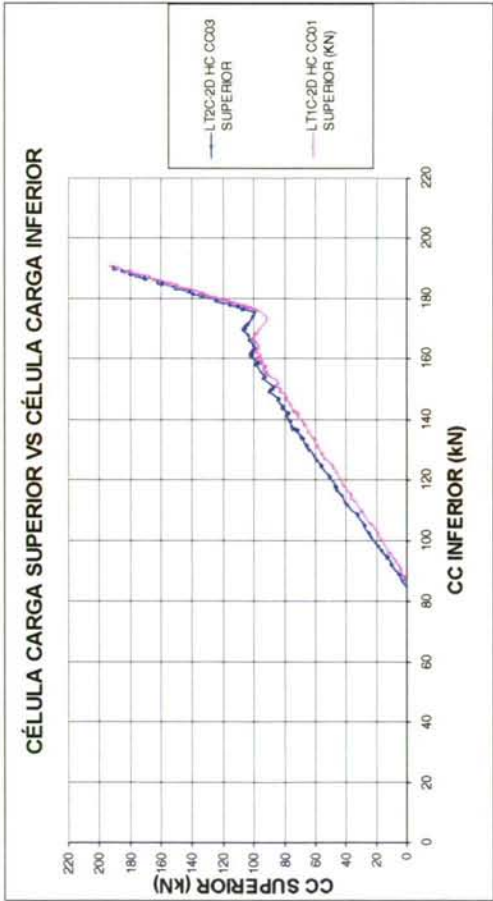
La Gráfica 6.2.2.1-7 exhibe el comportamiento de la fuerza unitaria adherente respecto al deslizamiento superior, a lo largo de todo el ensayo. Se aprecia que desde el inicio del ensayo se produjo deslizamiento en la parte superior. La pérdida de adherencia se inicia en la parte superior de la probeta, y se propaga a lo largo de la probeta hasta alcanzar la parte inferior. En el instante, como hemos explicado en el Apartado 6.1, en el que se detecta deslizamiento en la parte inferior se dice que se ha producido deslizamiento generalizado a lo largo de toda la probeta.

Según se aprecia en la Gráfica 6.2.2.1-8, la F.U.A. antes del deslizamiento generalizado alcanza un valor de 235-275 kN/m. Tras el deslizamiento generalizado este valor desciende hasta 200-220 kN/m, para un deslizamiento inferior de 0.50-0.75 mm. Para valores elevados de deslizamiento, de 2.90-3.10 mm, se alcanza una F.U.A. de 280-290 kN/m en ambos pórticos, incluso superior a la que se produce antes del deslizamiento.

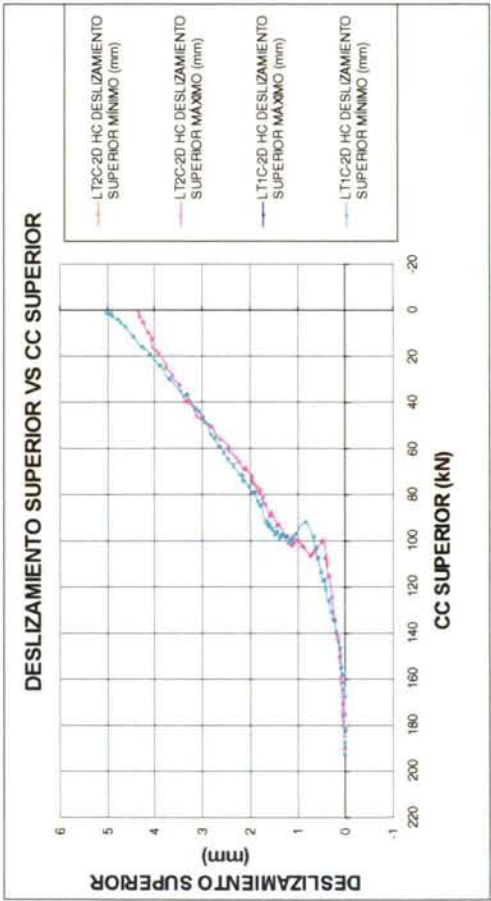
Creemos que la recuperación de la F.U.A. está motivado por el efecto Hoyer, debido al módulo de Poisson del acero, y por la adherencia mecánica del cordón debida a su forma: al transferirse la fuerza superior se produce un efecto anclaje mecánico. Esto consiste en que al perder carga, los alambres tienden a enderezarse y así rectificar la espiral, se produce un bulbo de anclaje que actúa como una cuña.

En todos estos ensayos se registró el giro de los transductores superior e inferior sujetos al cordón. Esto es debido a que el cordón de pretensado busca su posición de mínima energía, deslizándose por la hélice surcada durante el deslizamiento generalizado. Este fenómeno ya había sido señalado por otros investigadores (COUS86, DENU91).

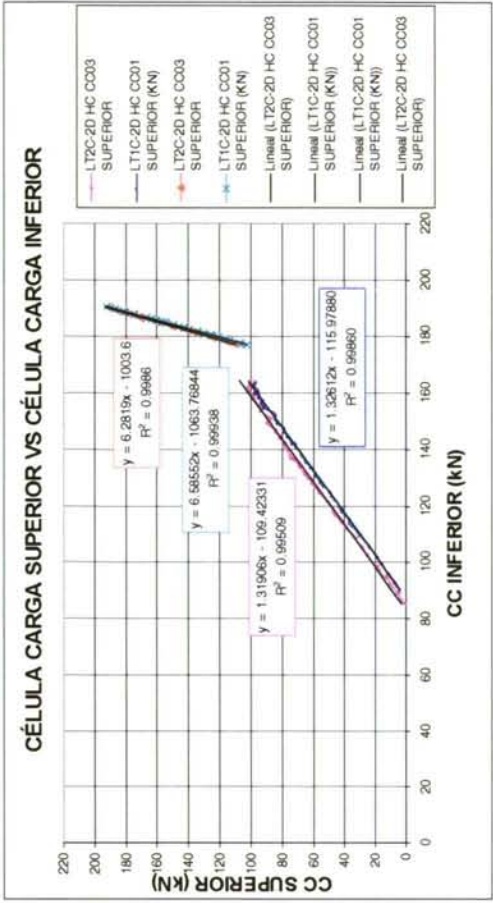
Un resumen de los datos de partida, características del ensayo y resultados obtenidos, se encuentra en la Tabla resumen 6.2.2.1-2.



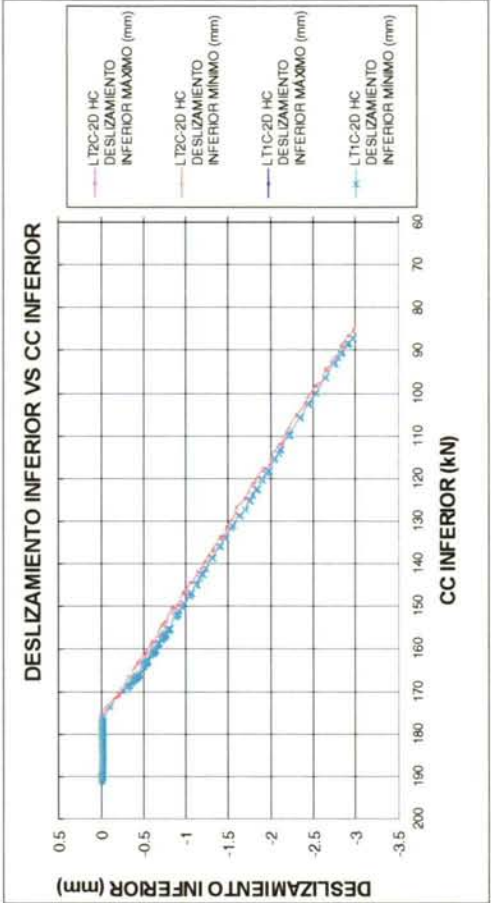
Gráfica 6.2.2.1-1



Gráfica 6.2.2.1-3

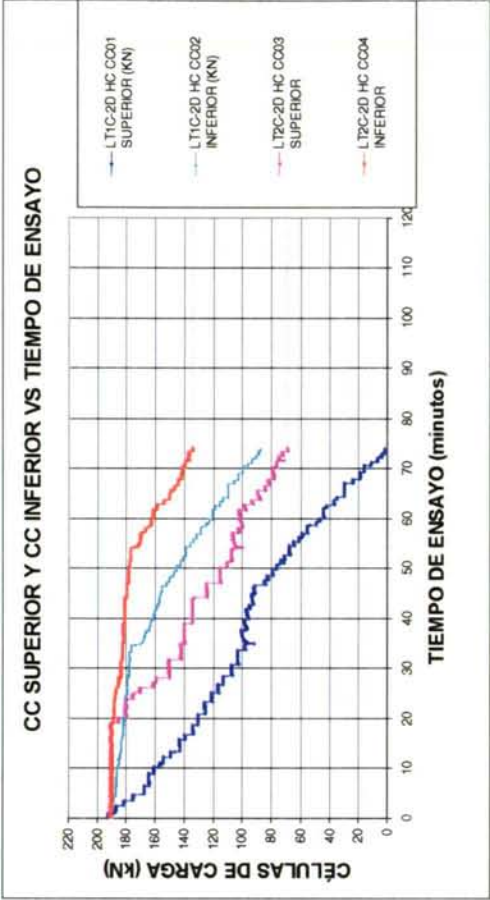


Gráfica 6.2.2.1-2

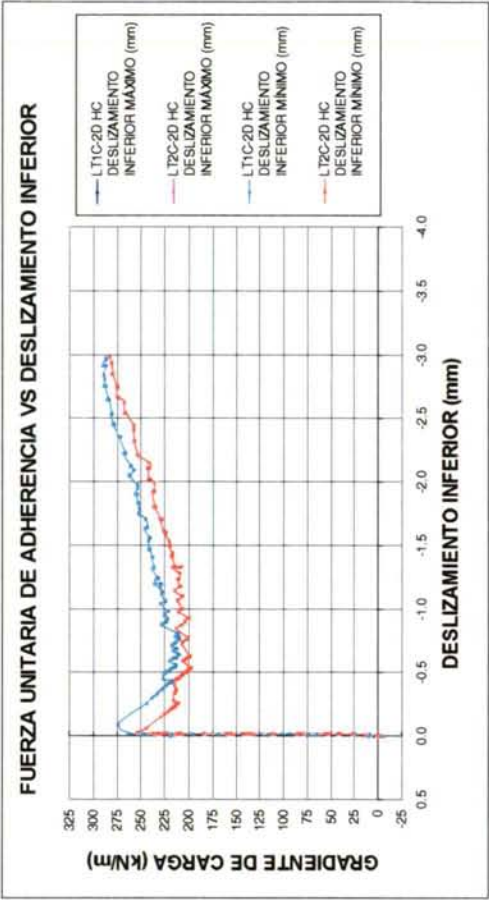


Gráfica 6.2.2.1-4

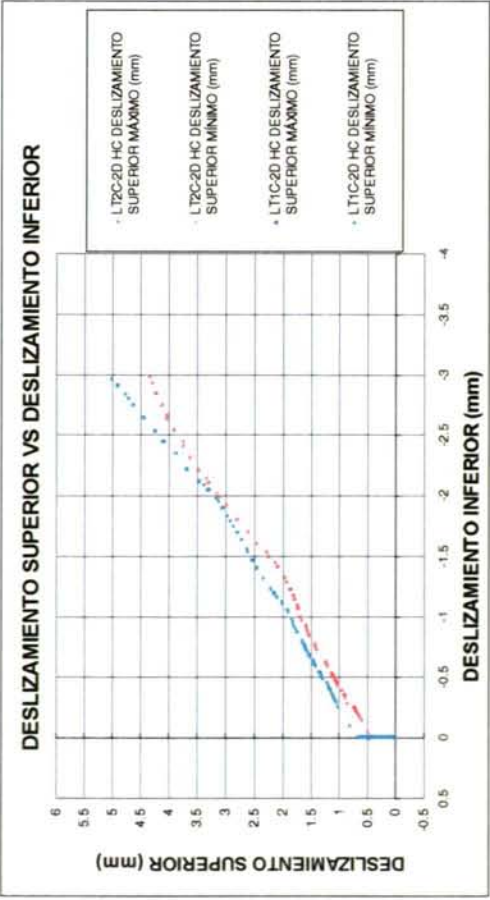




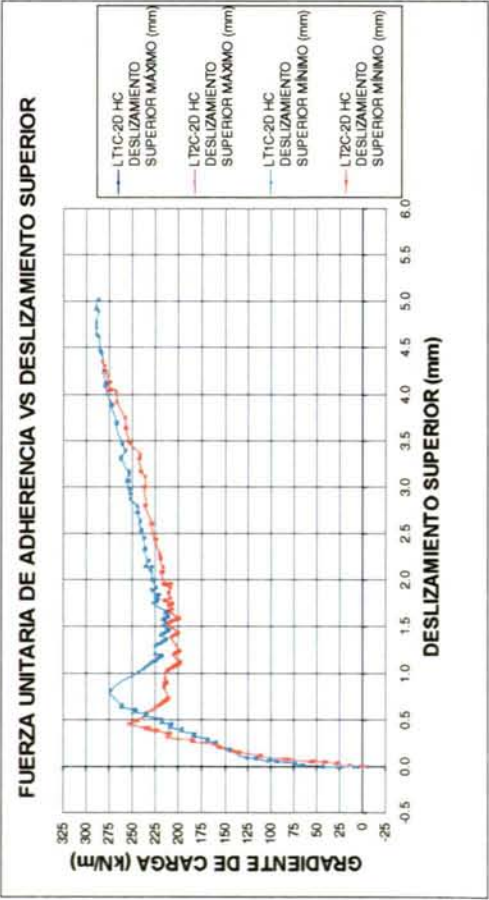
Gráfica 6.2.2.1-6



Gráfica 6.2.2.1-8



Gráfica 6.2.2.1-5



Gráfica 6.2.2.1-7

Tabla 6.2.2.1-1

Pórtico	Notación	LT1C-2D	LT2C-2D
Material		HC	HC
Fecha del hormigonado		14/10/1998	14/10/1998
Hora del fin de hormigonado		13:00	17:50
Fecha de ensayo		16/10/1998	16/10/1998
Hora del inicio del ensayo		13:12:25	17:42:22
Edad de ensayo (días)		2.01	1.99
Duración ensayo (minutos)		73.28	95.02
Duración ensayo total (días)		0.05	0.07
Carga superior inicio ensayo $P(t_0)$ (kN)		192.40	190.84
Carga superior mínima alcanzada durante el ensayo (kN)		1.10	-0.58
Carga inferior correspondiente a la carga inferior mínima durante el ensayo (kN)		88.32	85.18
Fuerza unitaria de adherencia máxima (kN/m)	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC,LT,2,max}$	289.28	282.34
Deslizamiento inferior máximo para fuerza unitaria de adherencia máxima alcanzada durante el ensayo (kN)	$\delta_{HC,LT,2,max}^{MAX}$	-2.92	-2.98
Deslizamiento inferior mínimo para fuerza unitaria de adherencia máxima alcanzada durante el ensayo (kN)	$\delta_{HC,LT,2,max}^{MIN}$	-2.92	-2.98
Fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento inferior (kN/m)	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC,LT,2,max,AD}$	260.07	253.95
Deslizamiento inferior máximo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento inferior (kN/m)	$\delta_{HC,LT,2,max,AD}^{MAX}$	-0.02	-0.02
Deslizamiento inferior mínimo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento inferior (kN/m)	$\delta_{HC,LT,2,max,AD}^{MIN}$	-0.02	-0.02
Fuerza unitaria de adherencia mínima durante ensayo tras haberse producido deslizamiento generalizado (kN/m)	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC,LT,2,min,DD}$	209.70	196.70
Fuerza unitaria de adherencia mínima diferida tras haberse producido deslizamiento generalizado (kN/m)	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC,LT,2,min,DD,DIF}$	209.70	196.70
Tensión de compresión longitudinal máxima en la probeta (MPa) a la edad de ensayo	$\sigma_{c,max}$	4.91	4.79
Resistencia a compresión probeta normalizada a la edad de ensayo (MPa)	$f_{cm,2}$	46	49
Resistencia a tracción directa a la edad de ensayo (MPa)	$f_{ctm,2}$	3.2	2.9



### 6.2.2.2. Pórticos LT1L101-2D y LT2L101-2D

En la Tabla 6.2.2.2-1 se especifica el material y la edad de ensayo de ambos pórticos.

Tabla 6.2.2.2-1

Nombre del ensayo	Material	Edad de ensayo (días)
LT1L101-2D/LT2L101-2D	HL10-1	2

En general, observando las Gráficas 6.2.2.2-1 a 6.2.2.2-8 se aprecia que los ensayos de ambos pórticos presentan más dispersión que los pórticos anteriores. Esto indica la conveniencia de realizar dos ensayos simultáneos.

En las Gráficas 6.2.2.2-1 y 6.2.2.2-2 se observa que el comportamiento de ambos pórticos durante la fase inicial es bastante similar. El deslizamiento generalizado se produce cuando la fuerza superior es de 80-100 kN. Tras el deslizamiento generalizado la pendiente de la curva es sensiblemente constante, ligeramente superior a la unidad. En el pórtico 2 se detectan dos “pull-out” posteriores (que corresponden a los quiebros posteriores al deslizamiento generalizado).

Se observa que, inmediatamente después de cada “pull-out”, en el pórtico 2 se produce un aumento de la carga superior y un descenso de la carga inferior, debido a que la pérdida de adherencia originada favorece que se igualen los valores de la fuerza en ambos extremos de la probeta: por ser la configuración de mínima energía. Esto es una consecuencia del deslizamiento descendente.

Entre dos “pull-out” consecutivos se observa una pendiente similar a la que presenta la zona inicial de la curva, es decir, se restablece una adherencia similar a la perfecta, antes del deslizamiento generalizado (esto se aprecia con claridad también en las Gráficas 6.2.2.2-7 y 6.2.2.2-8). Creemos que el motivo es que la adherencia mecánica mejora como consecuencia del “pull-out”. Se observa que tras el “pull-out” aumenta progresivamente la F.U.A. hasta valores incluso superiores a los anteriores al deslizamiento generalizado (véanse la Gráficas 6.2.2.2-7 y 6.2.2.2-8). Cuando se alcanza la capacidad adherente mecánica/por rozamiento se desencadena otro “pull-out” (descarga o disipación de energía).

En la Gráfica 6.2.2.2-4 se aprecia que la fuerza inferior remanente al final del ensayo (cuando se anula la fuerza superior) es de aproximadamente 70 kN en el pórtico 2, en el que se producen los “pull-out” (probablemente la probeta más dañada), y de aproximadamente 90 kN en el pórtico 1.

Al igual que en el ensayo anterior, tal y como se aprecia en la Gráfica 6.2.2.2-6, se soltó el cordón al cabo de varias horas tras la finalización del ensayo, por lo que en este caso no se dispone del comportamiento diferido al cabo de varios días.

En la Gráfica 6.2.2.2-8 se aprecia que la F.U.A. antes del deslizamiento generalizado alcanza un valor máximo de 250 y 320 kN/m en los pórticos 1 y 2 respectivamente. Tras el deslizamiento generalizado este valor desciende a 200-240 kN/m, para un deslizamiento inferior de 0.50-1.50 mm. Para valores elevados de deslizamiento, de 3.00 y 4.00 respectivamente se registra una recuperación de la F.U.A. hasta 280-360

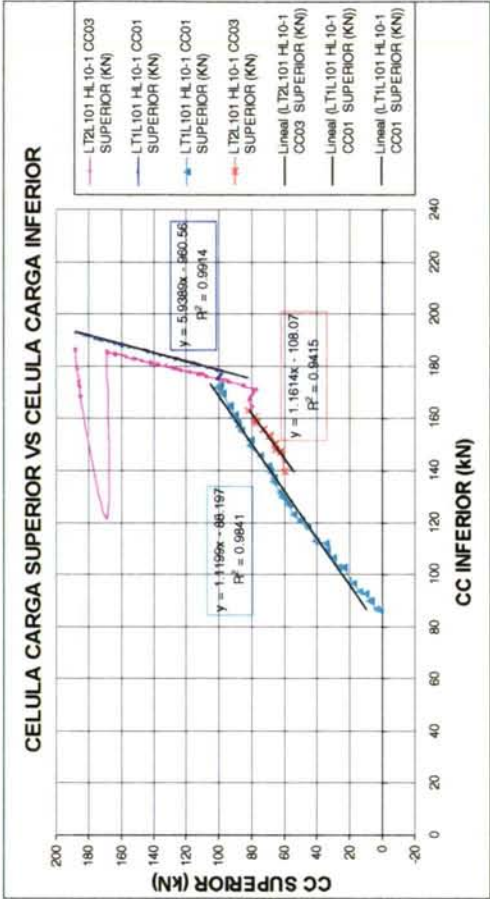
kN/m, superiores a los que se producen antes del deslizamiento. Este efecto se ha explicado en el Apartado 6.2.2.2-1.

Un resumen de los datos de partida, características del ensayo y resultados obtenidos, se encuentra en la Tabla 6.2.2.2-2.

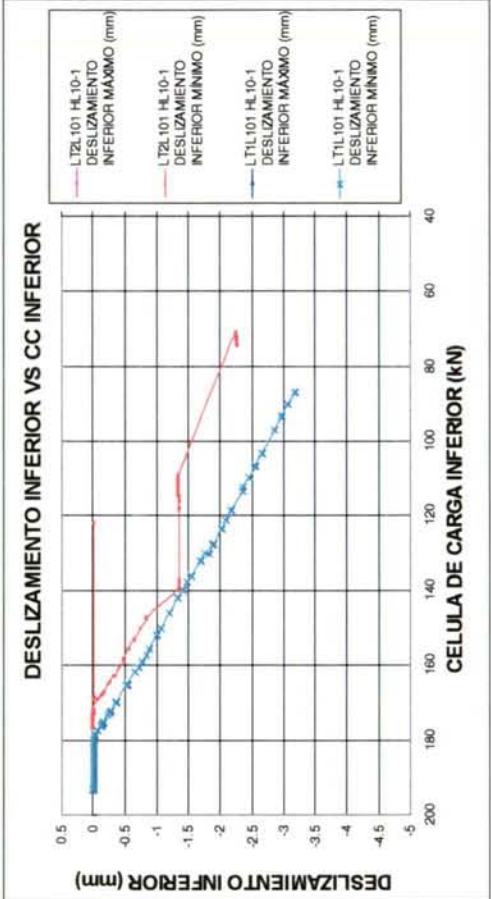
Las diferencias entre los ensayos de ambos pórticos se deben a los sucesivos “pull-out” del pórtico 2. Se comprueba que el hecho de que se produzcan deslizamientos súbitos de pretensado en la zona exterior de la longitud de transmisión puede contribuir a restablecer una buena adherencia en las zonas afectadas, con tensiones de adherencia similares o superiores a las de la zona próxima a la de adherencia perfecta.

Se concluye que en los ensayos en que el deslizamiento se produce de forma gradual, tras el deslizamiento generalizado se mantiene sensiblemente constante o aumenta ligeramente la F.U.A. para valores crecientes del deslizamiento. De esta forma se justifica también que puedan aparecer varios máximos en el valor de la tensión de adherencia, a lo largo de la zona de transmisión (véase Capítulo 2, FUJI72). Por otra parte se explica que la tensión de adherencia sea sensiblemente constante en la zona de transmisión (DENU91), lo que conduce a que la fuerza de pretensado presente un comportamiento lineal a lo largo de la zona de transmisión.

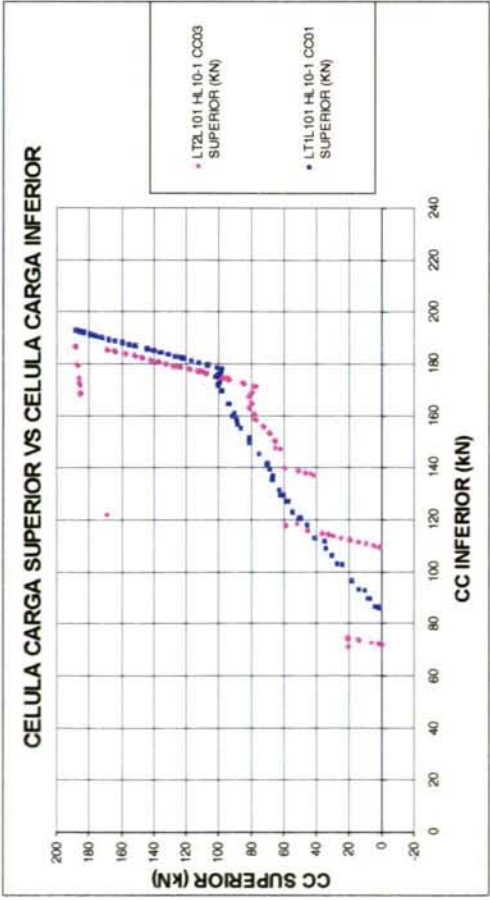




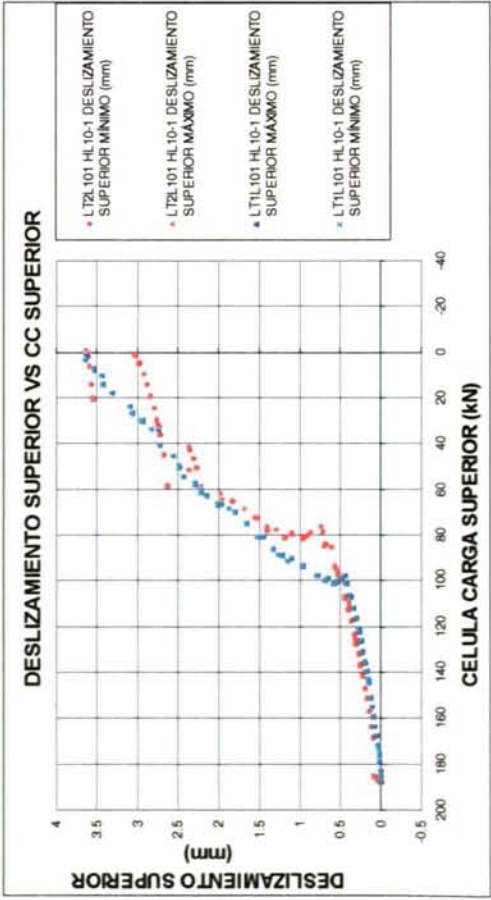
Gráfica 6.2.2.2-2



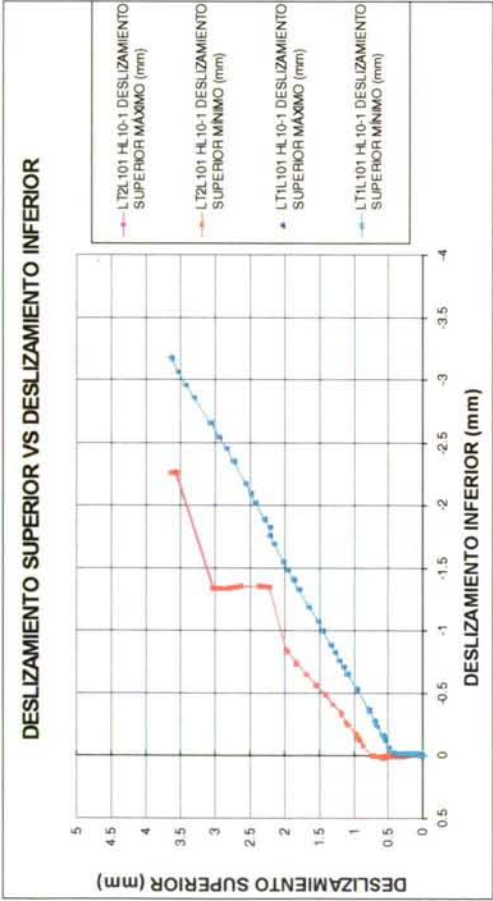
Gráfica 6.2.2.2-4



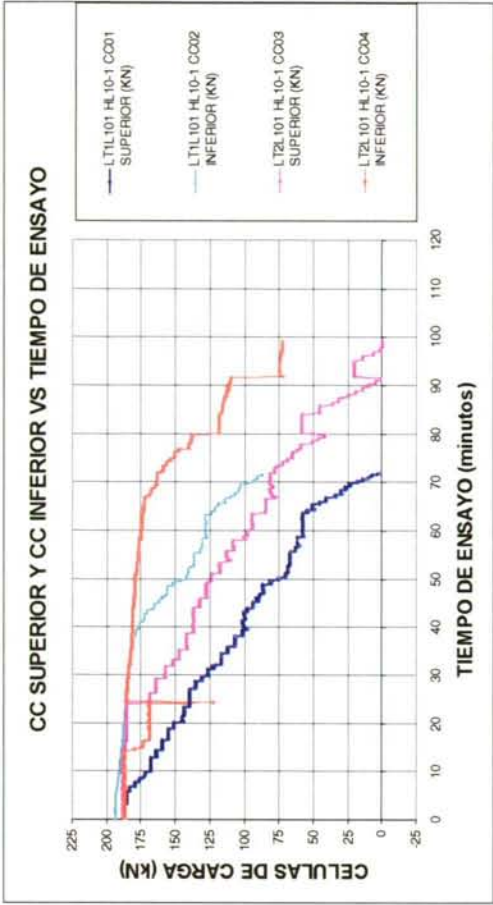
Gráfica 6.2.2.2-1



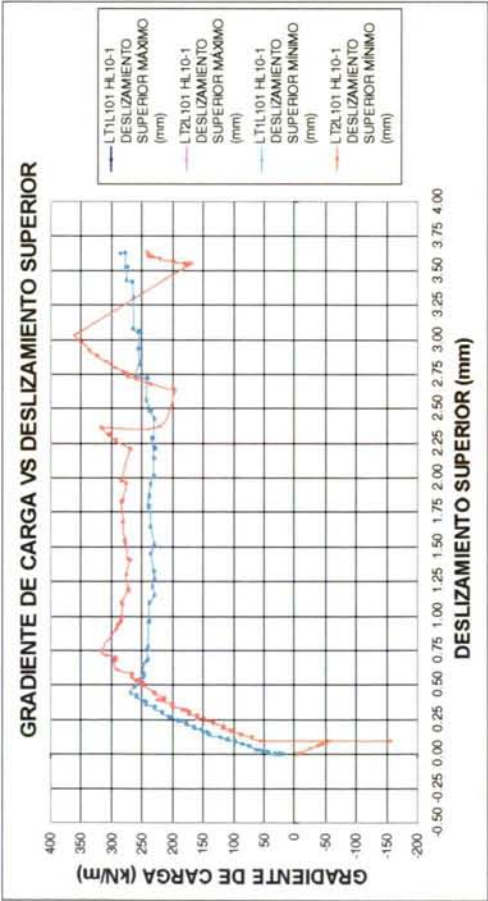
Gráfica 6.2.2.2-3



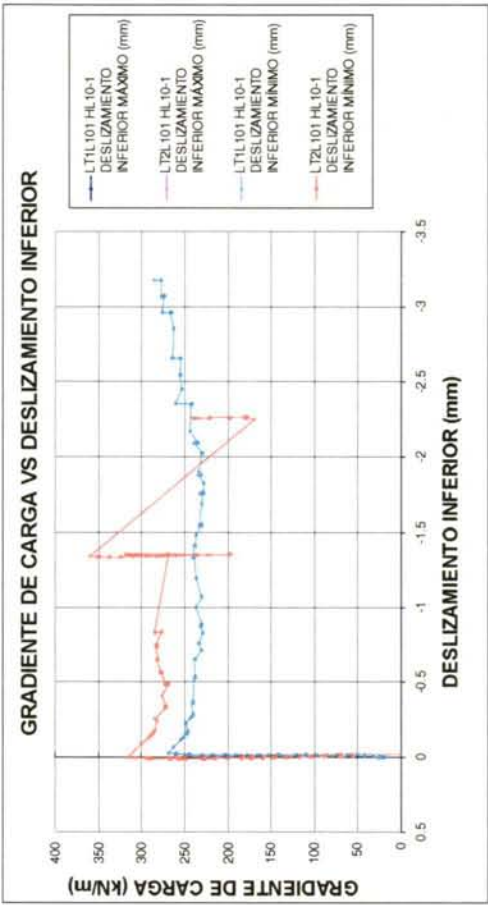
Gráfica 6.2.2.2-5



Gráfica 6.2.2.2-6



Gráfica 6.2.2.2-7



Gráfica 6.2.2.2-8



Tabla 6.2.2.2-2

Pórtico	Notación	LT1L101-2D	LT2L101-2D
Material		HL10-1	HL10-1
Fecha del hormigonado		07/10/98	07/10/98
Hora del fin de hormigonado		13:07	17:45:00
Fecha de ensayo		09/10/1998	09/10/1998
Hora del inicio del ensayo		14:01:10	18:56:56
Edad de ensayo (días)		2.04	2.05
Duración ensayo (minutos)		72.20	97.92
Duración ensayo total (días)		0.05	0.07
Carga superior inicio ensayo $P(t)$ (kN)		187.45	187.68
Carga superior mínima alcanzada durante el ensayo (kN)		0.88	-0.68
Carga inferior correspondiente a la carga inferior mínima durante el ensayo (kN)		86.64	71.92
Fuerza unitaria de adherencia máxima (kN/m)		$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC,LT,2,max}$	360.91
Deslizamiento inferior máximo para fuerza unitaria de adherencia máxima alcanzada durante el ensayo (kN)		$\delta_{HC,LT,2,max}^{MAX}$	-2.26
Deslizamiento inferior mínimo para fuerza unitaria de adherencia máxima alcanzada durante el ensayo (kN)		$\delta_{HC,LT,2,max}^{MIN}$	-2.26
Fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento inferior (kN/m)		$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC,LT,2,max,AD}$	316.43
Deslizamiento inferior máximo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento inferior (kN/m)		$\delta_{HC,LT,2,max,AD}^{MAX}$	0.00
Deslizamiento inferior mínimo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento inferior (kN/m)		$\delta_{HC,LT,2,max,AD}^{MIN}$	0.00
Fuerza unitaria de adherencia mínima durante ensayo tras haberse producido deslizamiento generalizado (kN/m)		$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC,LT,2,min,DD}$	169.41
Fuerza unitaria de adherencia mínima diferida tras haberse producido deslizamiento generalizado (kN/m)		$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC,LT,2,min,DD,DIF}$	169.41
Tensión de compresión longitudinal máxima en la probeta (MPa) a la edad de ensayo		$\sigma_{c,max}$	6.13
Resistencia a compresión probeta normalizada a la edad de ensayo (MPa)		$f_{cm,2}$	47.45
Resistencia a tracción directa a la edad de ensayo (MPa)		$f_{ctm,2}$	2.99

### 6.2.2.3. Pórticos LT1L31-2D y LT2L31-2D

En la Tabla 6.2.2.3-1 se especifica el material y la edad de ensayo de ambos pórticos.

Tabla 6.2.2.3-1

Nombre del ensayo	Material	Edad de ensayo (días)
LT1L31-2D/ LT2L31-2D	HL3-1	2

En las Gráficas 6.2.2.3-1 a 6.2.2.3-8 se aprecia la gran similitud del comportamiento de ambos pórticos, en las fases anterior al deslizamiento generalizado y posterior al mismo.

El pórtico 1 presenta en la segunda fase, de adherencia residual, varios “pull-out”, seguidos de un tramo sensiblemente recto hasta el final del ensayo, en el que la F.U.A. se mantiene sensiblemente constante (véase la Gráfica 6.2.2.3-8). Al final del ensayo, la fuerza inferior remanente es de aproximadamente 80 kN.

El pórtico 2, entre dos “pull-out” sucesivos, exhibe un comportamiento de adherencia perfecta. De hecho, como se puede comprobar en la Gráfica 6.2.2.3-8, el deslizamiento se concentra en los “pull-out”, mientras que entre dos “pull-out” consecutivos no se produce deslizamiento inferior. Al final del ensayo la fuerza inferior remanente es de 100 kN (véase la Gráfica 6.2.2.3-1).

De los resultados de este apartado y del Apartado 6.2.2.2 se concluye que la adherencia residual, tras el deslizamiento generalizado se puede manifestar de dos formas:

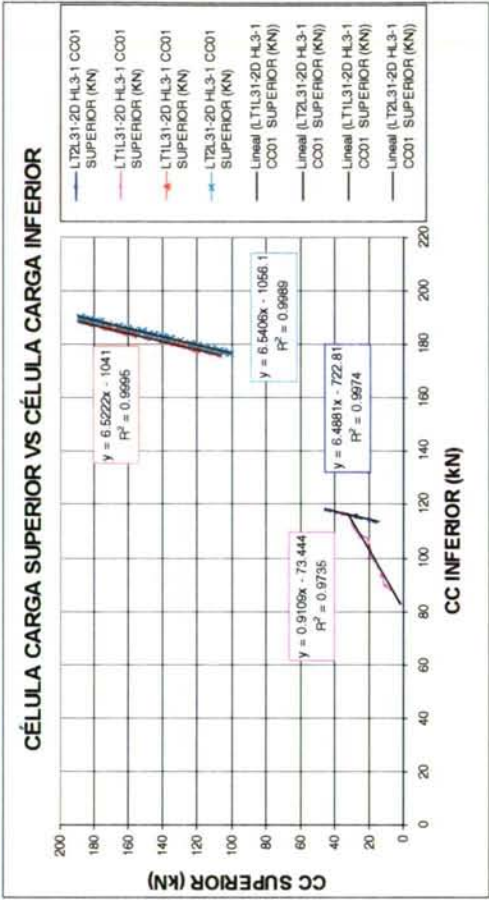
- Adherencia residual continua (no necesariamente constante) tras el deslizamiento.
- Adherencia residual que se manifiesta de una forma discontinua, en los períodos entre dos “pull-out” consecutivos. Se produce una secuencia de sucesivos “pull-out” + restablecimiento de la adherencia perfecta.

Analizando la Gráfica 6.2.2.3-8 se observa:

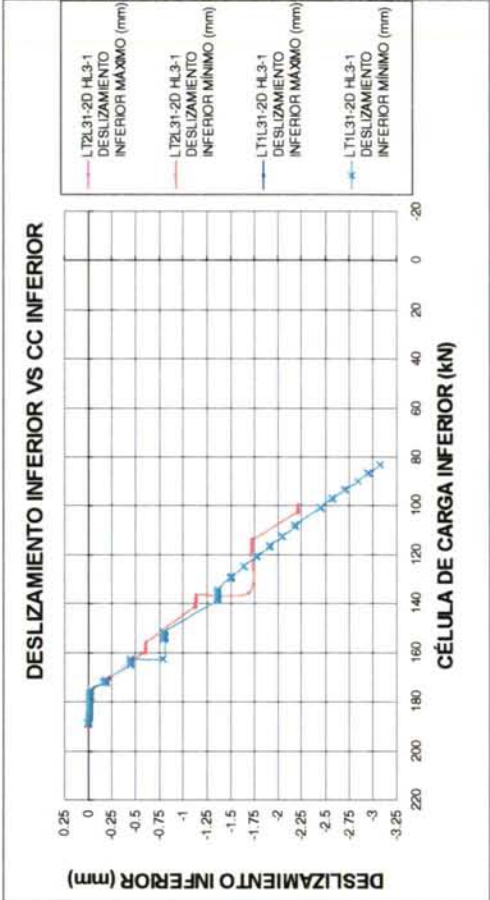
- En el pórtico 2, tras el deslizamiento generalizado, la F.U.A. se recupera, e incluso se supera tras cada “pull-out”, respecto a los valores alcanzados anteriormente. De hecho la F.U.A. máxima se alcanza tras el último “pull-out”. De esto se deduce que la adherencia mecánica juega un papel muy importante para grandes deslizamientos.
- El mismo comportamiento se observa en el pórtico 1, si bien en la zona final la F.U.A. disminuye ligeramente, aunque se mantiene por encima del valor alcanzado antes del deslizamiento generalizado.

En la Tabla 6.2.2.3-2 se resumen los resultados de estos ensayos.

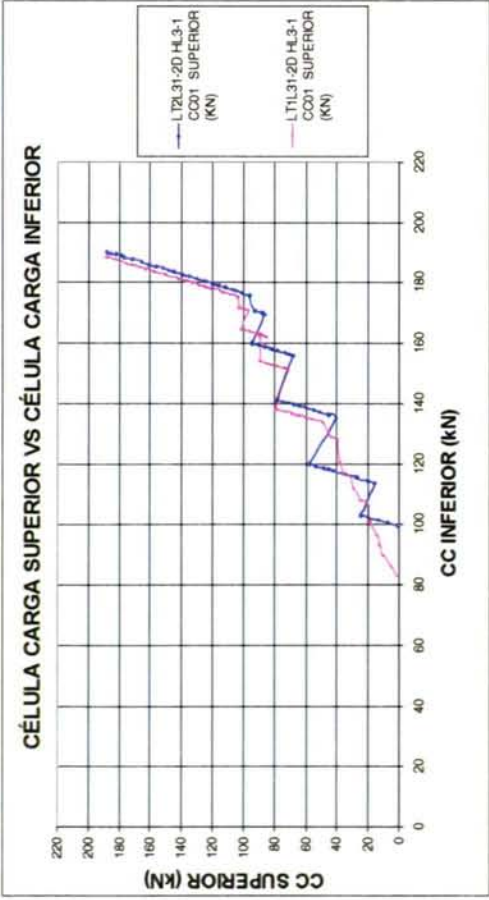




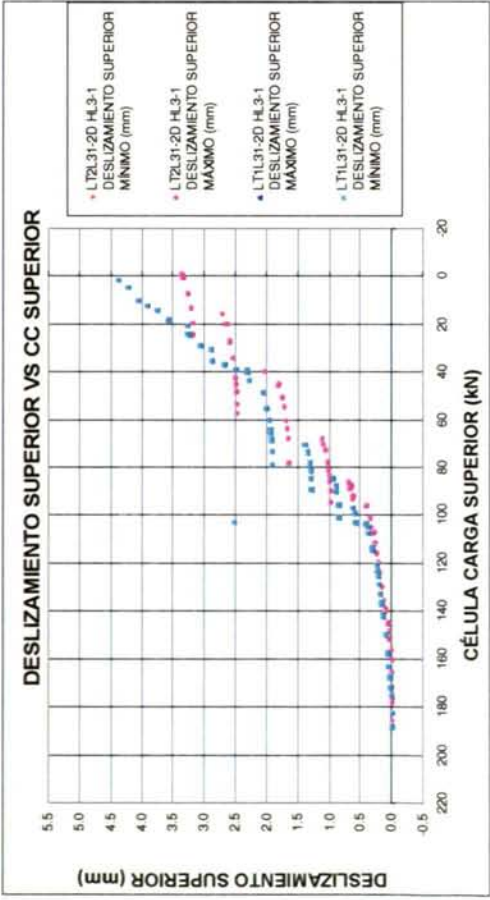
Gráfica 6.2.2.3-2



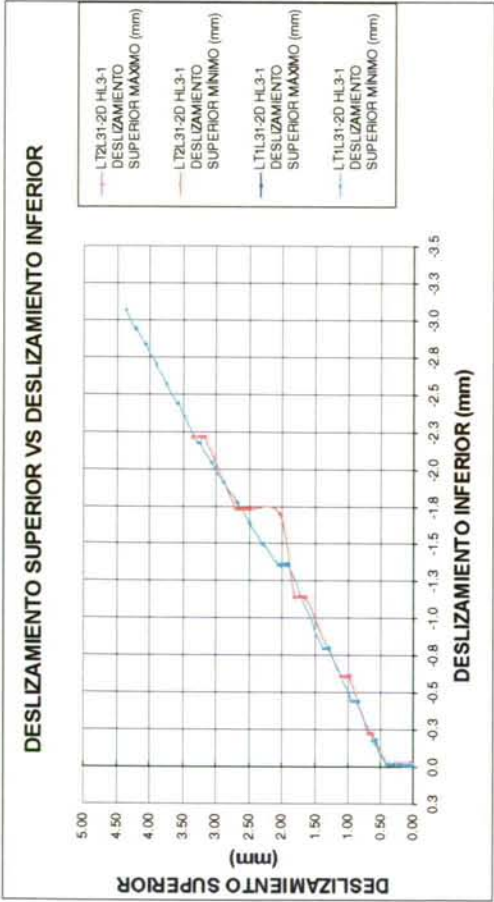
Gráfica 6.2.2.3-3



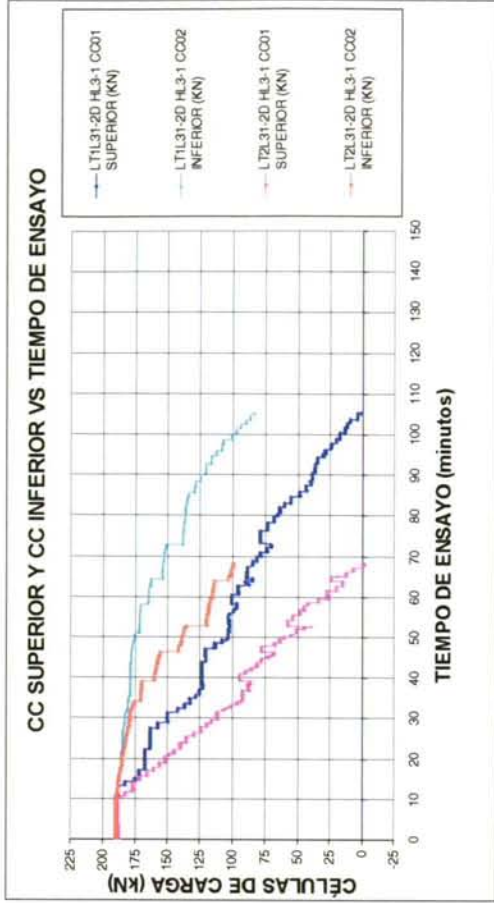
Gráfica 6.2.2.3-4



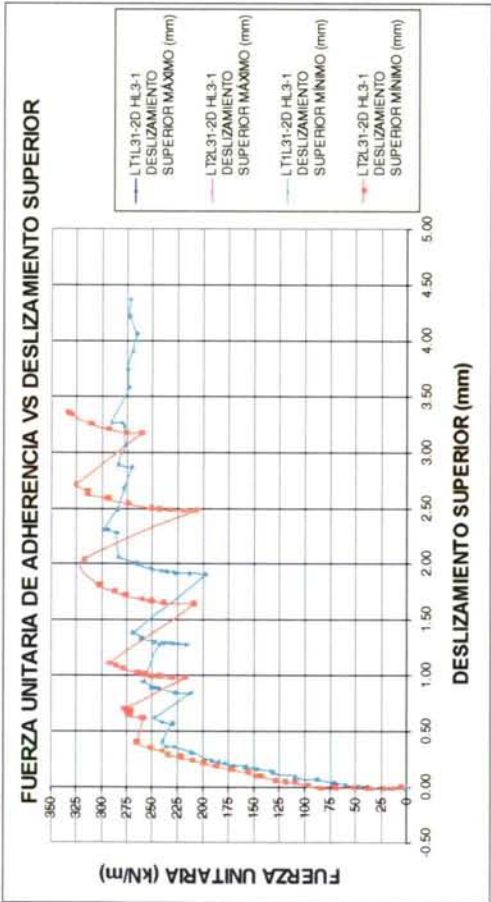
Gráfica 6.2.2.3-5



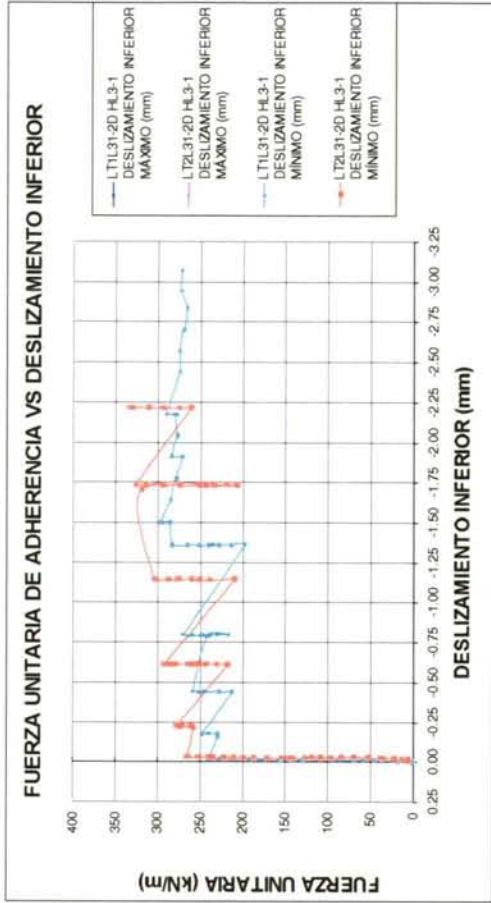
Gráfica 6.2.2.3-5



Gráfica 6.2.2.3-6



Gráfica 6.2.2.3-7



Gráfica 6.2.2.3-8



Tabla 6.2.2.3-2

Pórico	Notación	LT1L31-2D	LT2L31-2D
Material		HL3-1	HL3-1
Fecha del hormigonado		21/10/1998	21/10/1998
Hora del fin de hormigonado		12:09	16:59
Fecha de ensayo		23/10/1998	23/10/1998
Hora del inicio del ensayo		12:18:33	16:32:41
Edad de ensayo (días)		2.01	1.98
Duración ensayo (minutos)		105.42	67.92
Duración ensayo total (días)		0.07	0.05
Carga superior inicio ensayo $P_i(t)$ (kN)		188.20	187.84
Carga superior mínima alcanzada durante el ensayo (kN)		1.42	-0.58
Carga inferior correspondiente a la carga inferior mínima durante el ensayo (kN)		82.93	99.52
Fuerza unitaria de adherencia máxima (kN/m)			
	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HL3-1,LT,2,max}$	297.19	333.65
Deslizamiento inferior máximo para fuerza unitaria de adherencia máxima alcanzada durante el ensayo (kN)	$\delta_{HL31,LT,2,max}^{MAX}$	-1.50	-2.21
Deslizamiento inferior mínimo para fuerza unitaria de adherencia mínima alcanzada durante el ensayo (kN)	$\delta_{HL31,LT,2,max}^{MIN}$	-1.50	-2.21
Fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento inferior (kN/m)			
	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HL31,LT,2,max,AD}$	239.10	235.12
Deslizamiento inferior máximo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento inferior (kN/m)	$\delta_{HL31,LT,2,max,AD}^{MAX}$	-0.02	-0.02
Deslizamiento inferior mínimo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento inferior (kN/m)	$\delta_{HL31,LT,2,max,AD}^{MIN}$	-0.02	-0.02
Fuerza unitaria de adherencia mínima durante ensayo tras haberse producido deslizamiento generalizado (kN/m)			
	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HL31,LT,2,min,DD}$	196.92	207.14
Fuerza unitaria de adherencia mínima diferida tras haberse producido deslizamiento generalizado (kN/m)			
	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HL31,LT,2,min,DD,DIF}$	196.92	207.14
Tensión de compresión longitudinal máxima en la probeta (MPa) a la edad de ensayo	$\sigma_{c,max}$	5.05	5.66
Resistencia a compresión probeta normalizada a la edad de ensayo (MPa)	$f_{cm,2}$	48.00	50.00
Resistencia a tracción directa a la edad de ensayo (MPa)	$f_{ctm,2}$	3.30	2.50

#### 6.2.2.4. Pórticos LT1C-3D y LT2C-3D

En la Tabla 6.2.2.4-1 se especifica el material y la edad de ensayo de ambos pórticos.

Tabla 6.2.2.4-1

Nombre del ensayo	Material	Edad de ensayo (días)
LT1C-3D/LT2C-3D	HC	3

Estos ensayos de simulación de la zona de transmisión se efectuaron una vez fabricadas las vigas de la segunda serie (proceso descrito en los Capítulos 9 y 10) para intentar verificar el ajuste de las predicciones de la longitud de transmisión a los valores determinados experimentalmente. Dado que la transferencia de las vigas de la segunda serie se produjo a los 3 días del hormigonado, se adoptó consecuentemente esta edad de ensayo.

En este caso, se mantuvo la diferencia de carga una vez finalizado el ensayo durante dos días (véase la Gráfica 6.2.2.4-9).

Los resultados de este ensayo deberían aproximarse a los de los pórticos LTC1-2D y LTC2-3D puesto que la única diferencia, aparte de la procedencia de los componentes del hormigón (diferentes partidas de cemento, áridos y aditivo superfluidificante), es la edad de ensayo, que pasa de dos a tres días. Analizando conjuntamente ambos ensayos se pueden valorar los efectos del aumento de la edad de transferencia en este material.

Analizando los resultados de ambos pórticos se aprecia una gran similitud entre ambos pórticos (Gráficas 6.2.2.4-1 a 6.2.2.4-9). En ambos se observa que el deslizamiento generalizado se produce para una fuerza superior de 65-70 kN. Tras el deslizamiento generalizado no se detectó ningún “pull-out”. La pendiente del ajuste lineal de la curva de la Gráfica 6.2.2.4-1, en la fase de adherencia residual es similar para ambos pórticos. La correlación de los ajustes lineales, al igual que en los ensayos anteriores, es muy elevada.

Si analizamos la Gráfica 6.2.2.4-8 se aprecia que el deslizamiento generalizado se produce para una F.U.A. de 325-350 kN/m, valores un 30% superiores a los de los pórticos LT1C-2D y LT1C-2D. Tras el deslizamiento la F.U.A. desciende ligeramente, pero se mantiene superior a 300 kN/m, hasta un deslizamiento generalizado de 1.75 mm. A partir de ese valor la F.U.A. aumenta hasta alcanzar valores similares a los máximos previos al deslizamiento. Esto implica una mejora de la F.U.A. de entre el 18% y el 42% respecto a los valores alcanzados en los ensayos LT1C-2D y LT1C-2D.

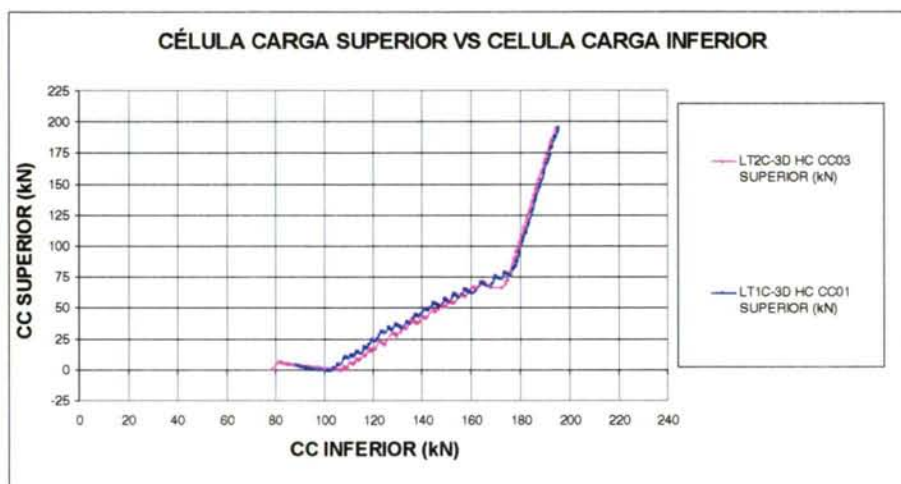
Por lo tanto, aumentando la edad de transferencia en tan sólo un día mejora apreciablemente la capacidad adherente. Los tramos descendentes de las curvas de la Gráfica 6.2.2.4-8 obedecen a los efectos diferidos: como es lógico, la F.U.A. tiende a disminuir con el tiempo.

En la Tabla 6.2.3.4-2 se resumen los resultados de estos ensayos.

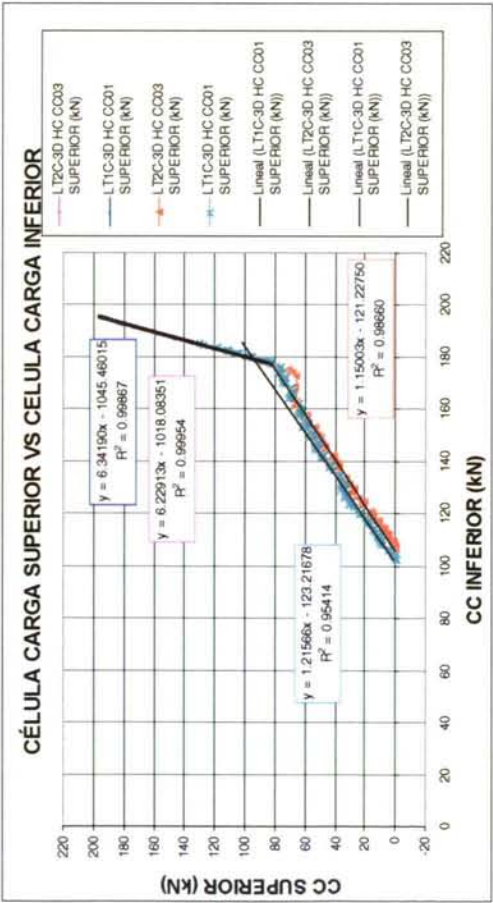
No se observa ningún “pull-out” diferido en ninguno de los pórticos, durante las 48 horas siguientes al final del ensayo (véase la Gráfica 6.2.2.4-9). Sí se aprecia una



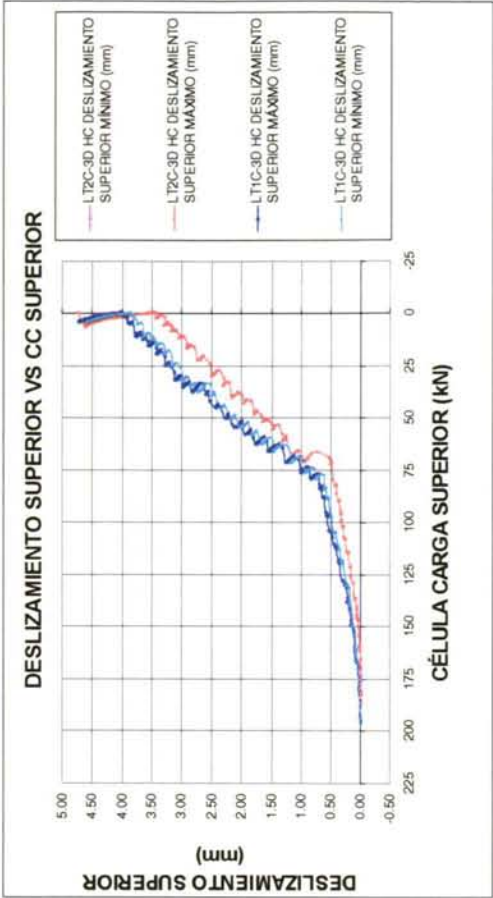
disminución paulatina del valor de la fuerza inferior, y un correspondiente aumento de la fuerza superior, probablemente debidos al deslizamiento diferido continuo (véanse las Gráficas 6.2.2.4-7 y 6.2.2.4-8).



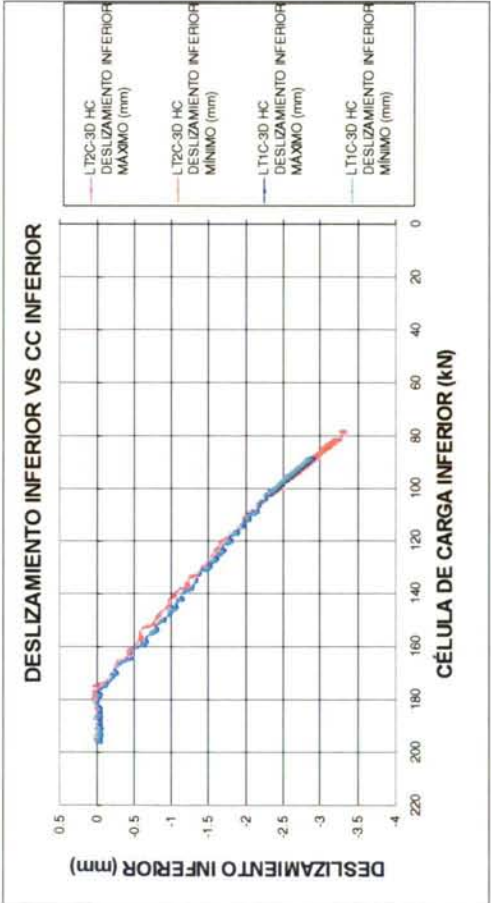
Gráfica 6.2.2.4-1



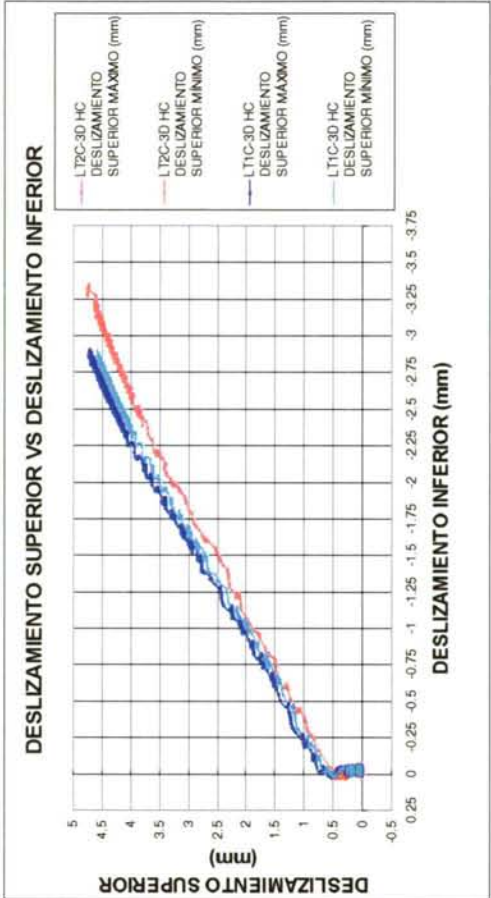
Gráfica 6.2.2.4-2



Gráfica 6.2.2.4-3

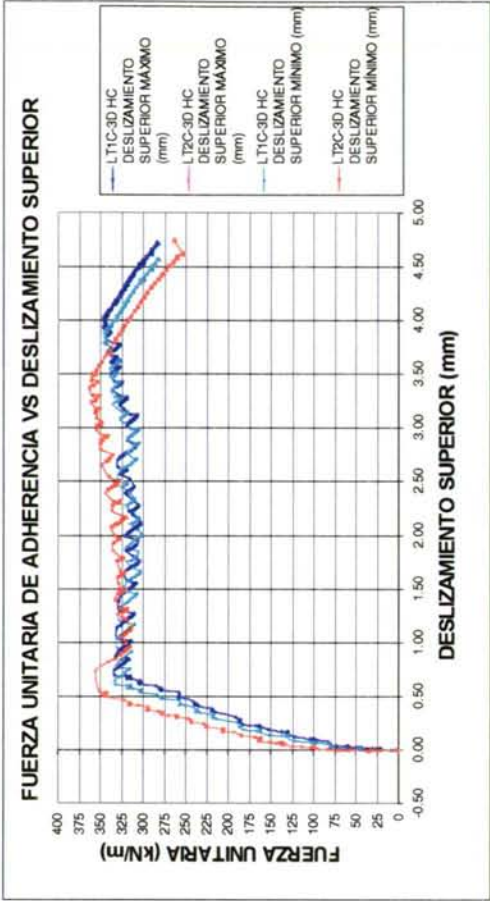


Gráfica 6.2.2.4-4

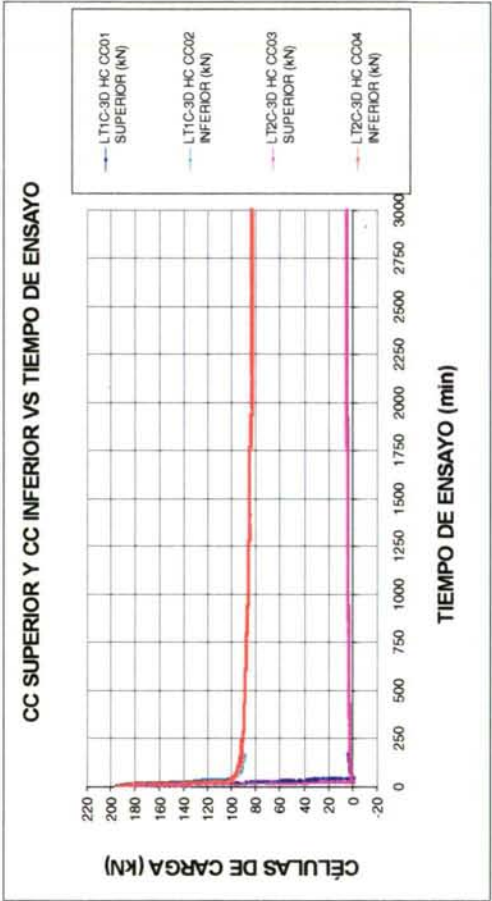


Gráfica 6.2.2.4-5

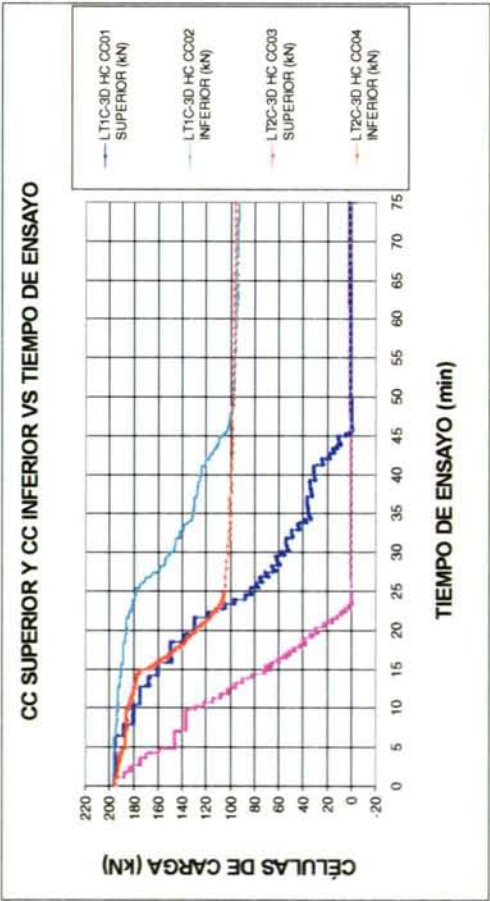




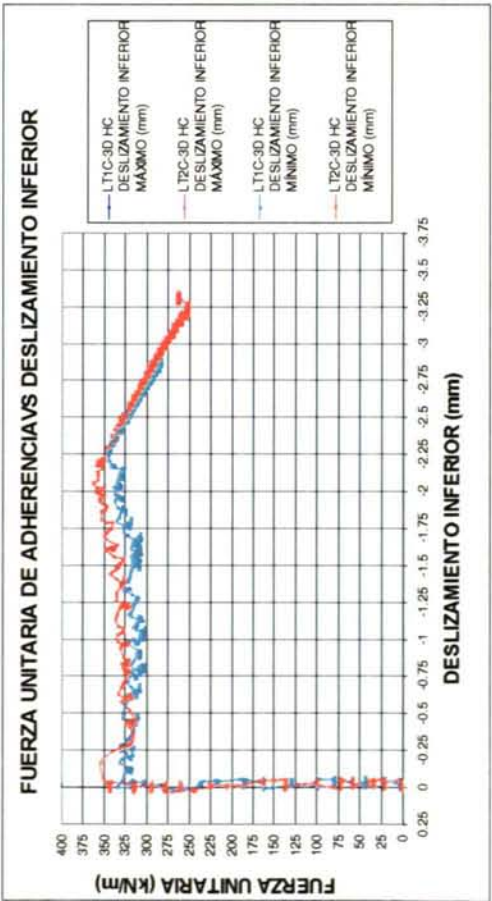
Gráfica 6.2.2.4-7



Gráfica 6.2.2.4-8



Gráfica 6.2.2.4-9



Gráfica 6.2.2.4-6

Tabla 6.2.2.4-1

Pórtico	Notación	LT1C-3D	LT2C-3D
Material		HC	HC
Fecha del hormigonado		11/04/00	11/04/00
Hora del fin de hormigonado		11:45:00	17:30:00
Fecha de ensayo		14/04/2000	14/04/2000
Hora del inicio del ensayo		13:09:28	18:04:27
Edad de ensayo (días)		3.06	3.02
Duración ensayo (minutos)		45.57	23.22
Duración ensayo total (días)		0.12	10.74
Carga superior inicio ensayo $P(t)$ (kN)	$P(t_0)$	194.89	194.76
Carga superior mínima alcanzada durante el ensayo (kN)		-1.11	-0.68
Carga inferior correspondiente a la carga inferior mínima durante el ensayo (kN)		103.34	106.76
Fuerza unitaria de adherencia máxima (kN/m)	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC,LT,3,max}$	345.74	362.76
Deslizamiento inferior máximo para fuerza unitaria de adherencia máxima alcanzada durante el ensayo (kN)	$\delta_{HC,LT,3,max}^{MAX}$	-2.27	-2.05
Deslizamiento inferior mínimo para fuerza unitaria de adherencia mínima alcanzada durante el ensayo (kN)	$\delta_{HC,LT,3,min}^{MIN}$	-2.27	-2.05
Fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento inferior (kN/m)	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC,LT,3,max,AD}$	332.68	342.77
Deslizamiento inferior máximo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento inferior (kN/m)	$\delta_{HC,LT,3,max,AD}^{MAX}$	-0.02	-0.01
Deslizamiento inferior mínimo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento inferior (kN/m)	$\delta_{HC,LT,3,max,AD}^{MIN}$	-0.02	-0.01
Fuerza unitaria de adherencia mínima durante ensayo tras haberse producido deslizamiento generalizado (kN/m)	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC,LT,3,min,DD}$	301.83	313.29
Fuerza unitaria de adherencia mínima diferida tras haberse producido deslizamiento generalizado (kN/m)	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC,LT,3,min,DD,DIF}$	282.31	250.89
Tensión de compresión longitudinal máxima en la probeta (MPa) a la edad de ensayo	$\sigma_{c,max}$	5.87	6.16
Resistencia a compresión probeta normalizada a la edad de ensayo (MPa)	$f_{cm,3}$	54.00	56.00
Resistencia a tracción directa a la edad de ensayo (MPa)	$f_{ctm,3}$	3.40	3.00



### 6.2.2.5. Pórticos LT1L102-3D y LT2L102-3D

En la Tabla 6.2.2.5-1 se especifica el material y la edad de ensayo de ambos pórticos.

Tabla 6.2.2.5-1

Nombre del ensayo	Material	Edad de ensayo (días)
LT1L102-3D/ LT2L102-3D	HC	3

En las Gráficas 6.2.2.1 a 6.2.2.8 se aprecia que aparentemente existe una gran dispersión entre los dos ensayos realizados, a partir del deslizamiento generalizado.

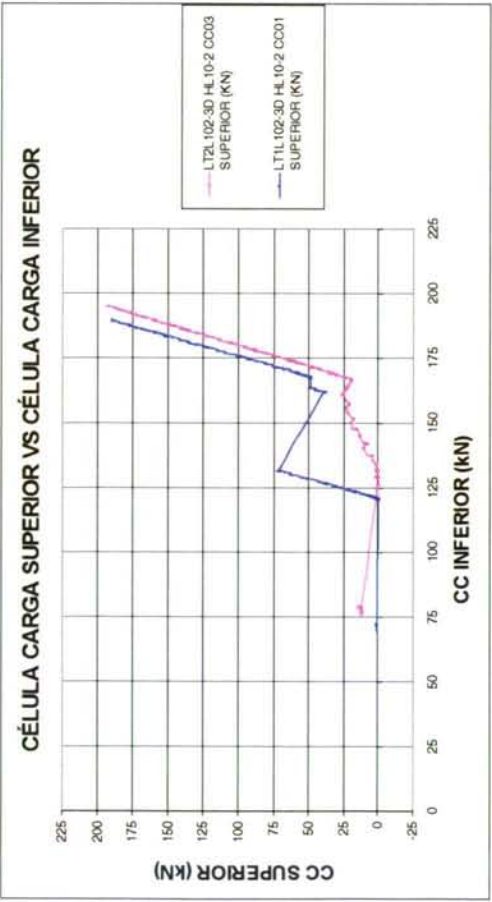
Durante la primera fase del ensayo, según se aprecia en la Gráfica 6.2.2.5-1, se transfiere gran parte de la fuerza superior a la probeta, antes del deslizamiento la célula de carga superior registra 20 kN y 40 kN en los pórticos 1 y 2 respectivamente. En la Gráfica 6.2.2.5-8 se aprecia que las F.U.A. alcanzadas son, antes del deslizamiento de 400 kN/m y 500 kN/m respectivamente, los valores más elevados de todos los ensayos realizados de este tipo (Apartados 6.2.2.1 a 6.2.2.5).

El deslizamiento generalizado se produce en el pórtico 1 de una forma brusca, con un “pull-out” muy pronunciado, acompañado de un deslizamiento inferior de 1.1 mm aproximadamente (véase Gráfica 6.2.2.5-8). Tras el deslizamiento generalizado, y hasta que la totalidad de la carga se ha transferido, no se detecta ningún “pull-out” posterior. La fuerza unitaria de adherencia alcanzada tras el “pull-out” presenta un valor similar al anterior al deslizamiento generalizado (véase Gráfica 6.2.2.5-8).

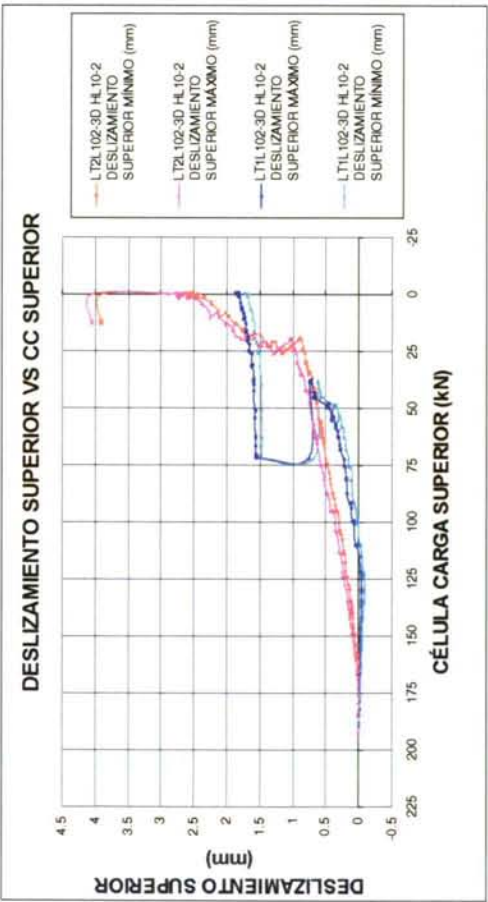
En el pórtico 2, tras el deslizamiento generalizado se detecta una fase de adherencia residual. La F.U.A. de esta fase es ligeramente decreciente con el deslizamiento (ver Gráfica 6.2.2.5-8).

Este ensayo se mantuvo durante 20 días aproximadamente para detectar los efectos diferidos de la adherencia. En ambos pórticos se produjeron “pull-out” diferidos: al cabo de 5 horas del final de ensayo (pórtico 2) y al cabo de dos días (pórtico 1). Esto se puede apreciar en la Gráfica 6.2.2.5-10. A pesar de que aparentemente ambos ensayos diferían inicialmente, los valores de F.U.A. finalmente obtenidos, tras el deslizamiento diferido son muy similares, como se puede observar en la Tabla 6.2.2.5-2, en la que se resumen los resultados de estos ensayos.

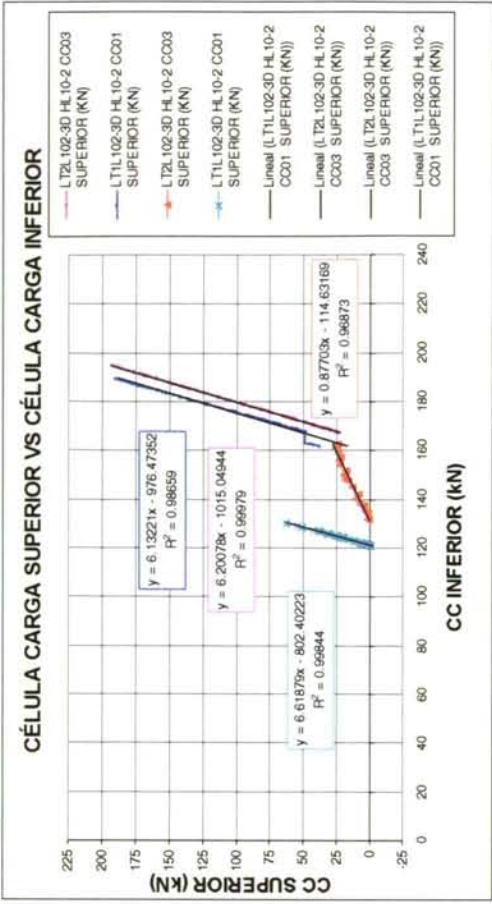
Los principales resultados y las características del ensayo se detallan en la Tabla 6.2.2.5-1.



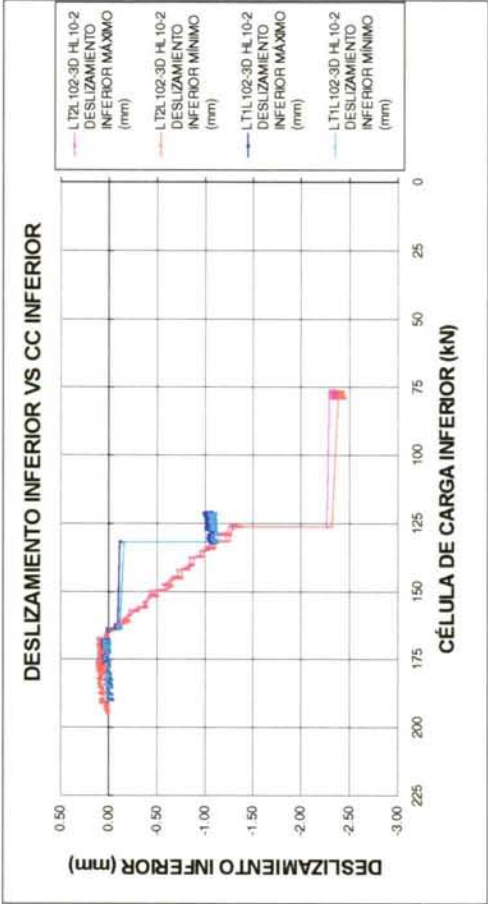
Gráfica 6.2.2.5-1



Gráfica 6.2.2.5-3

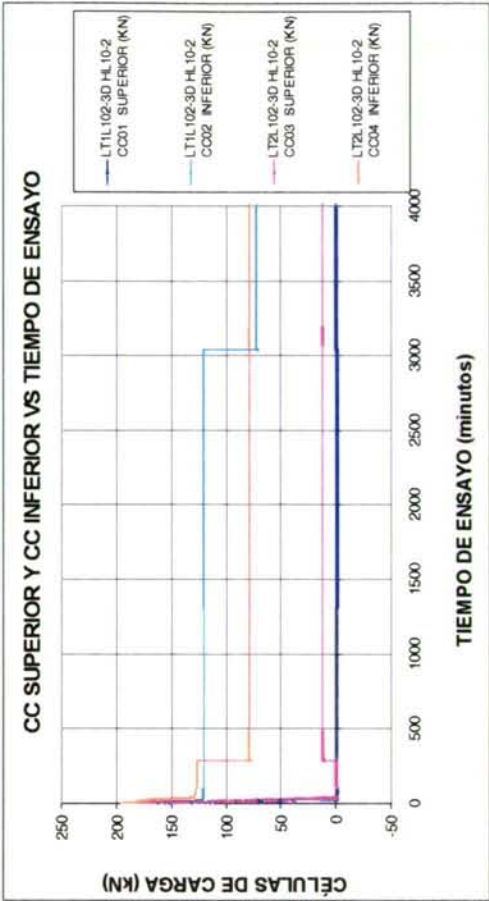


Gráfica 6.2.2.5-2

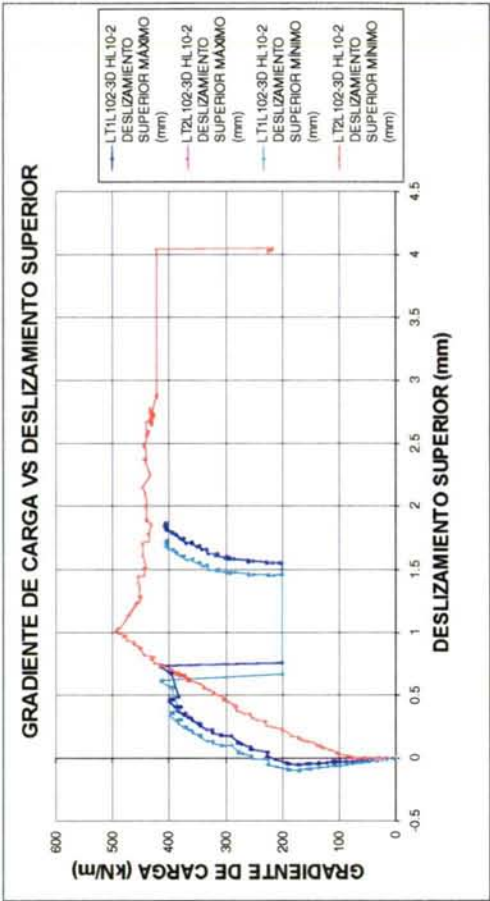


Gráfica 6.2.2.5-4

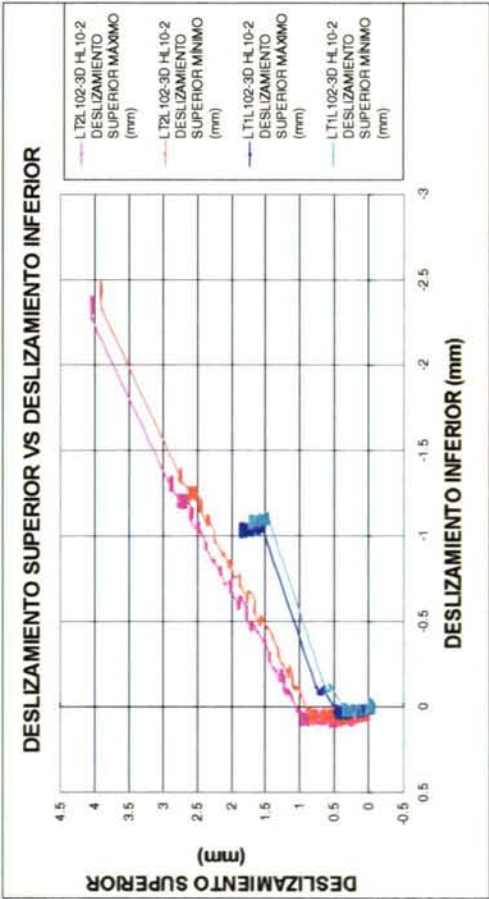




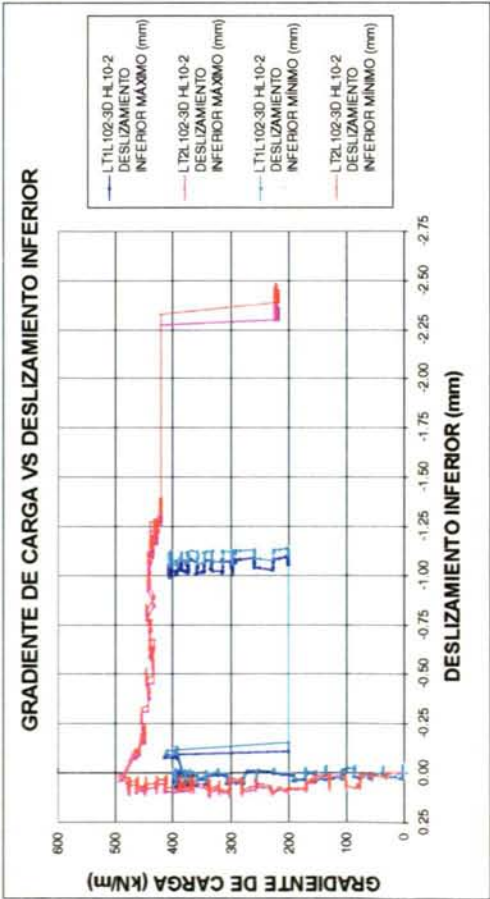
Gráfica 6.2.2.5-6



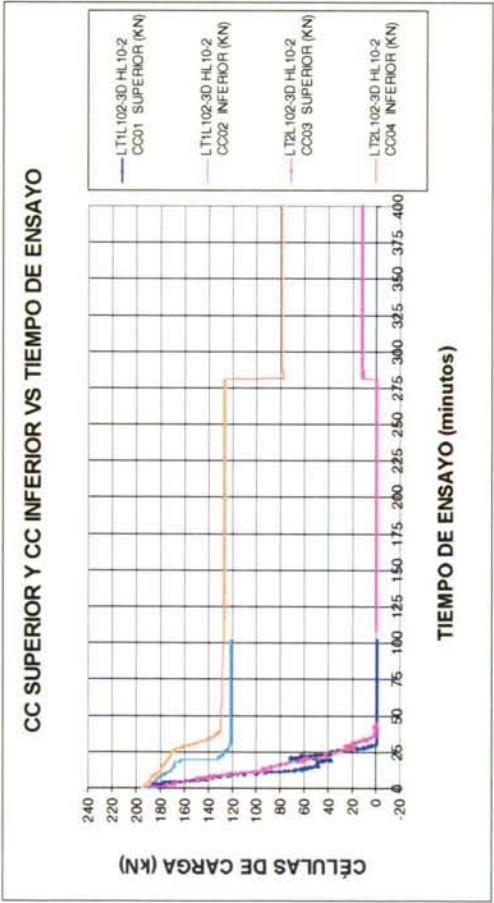
Gráfica 6.2.2.5-8



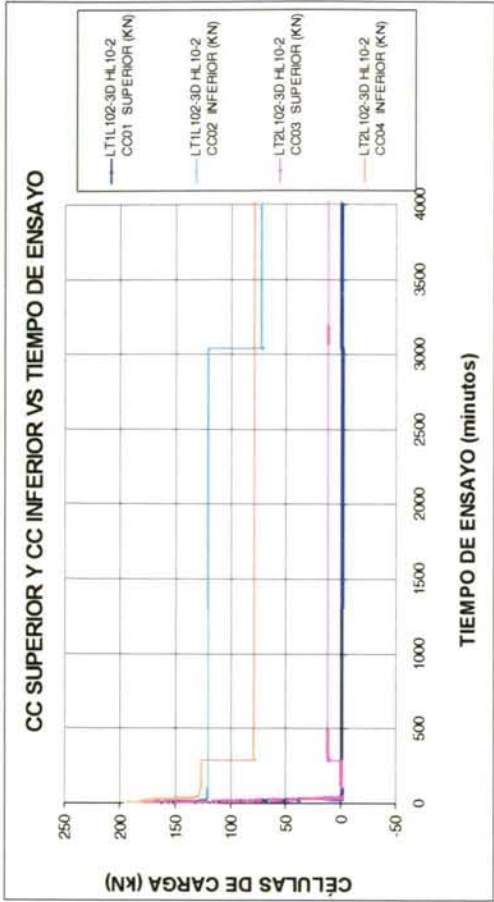
Gráfica 6.2.2.5-5



Gráfica 6.2.2.5-7



Gráfica 6.2.2.5-9



Gráfica 6.2.2.5-10



Tabla 6.2.2.5-1

Pórtico	Notación	LT1L102-3D	LT2L102-3D
Material		HL10-2	HL10-2
Fecha del hormigonado		02/05/2000	02/05/2000
Hora del fin de hormigonado		12:35:00	16:58:00
Fecha de ensayo		05/05/2000	05/05/2000
Hora del inicio del ensayo		13:20:53	16:53:22
Edad de ensayo (días)		3.03	3.00
Duración ensayo (minutos)		30.82	39.22
Duración ensayo total (días)		20.06	22.21
Carga superior inicio ensayo $P(t)$ (kN)		189.37	193.05
Carga superior mínima alcanzada durante el ensayo (kN)		-1.01	-0.58
Carga inferior correspondiente a la carga superior mínima durante el ensayo (kN)		120.99	131.47
Fuerza unitaria de adherencia máxima (kN/m)		415.93	492.31
Deslizamiento inferior máximo para fuerza unitaria de adherencia máxima alcanzada durante el ensayo (kN)		-0.08	0.04
Deslizamiento inferior mínimo para fuerza unitaria de adherencia máxima alcanzada durante el ensayo (kN)		-0.10	0.02
Fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento inferior (kN/m)		382.59	483.42
Deslizamiento inferior máximo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento inferior (kN/m)		0.01	0.02
Deslizamiento inferior mínimo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento inferior (kN/m)		0.01	0.02
Fuerza unitaria de adherencia mínima durante ensayo tras haberse producido deslizamiento generalizado (kN/m)		199.75	430.92
Fuerza unitaria de adherencia mínima diferida tras haberse producido deslizamiento generalizado (kN/m)		199.75	215.01
Tensión de compresión longitudinal máxima en la probeta (MPa) a la edad de ensayo		7.06	8.36
Resistencia a compresión probeta normalizada a la edad de ensayo (MPa)		59.00	57.00
Resistencia a tracción directa a la edad de ensayo (MPa)		3.40	3.10

### 6.2.3. RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En la Tabla 6.2.3-1 se resumen los resultados obtenidos, especificando los valores máximos y mínimos de la fuerza unitaria de adherencia.

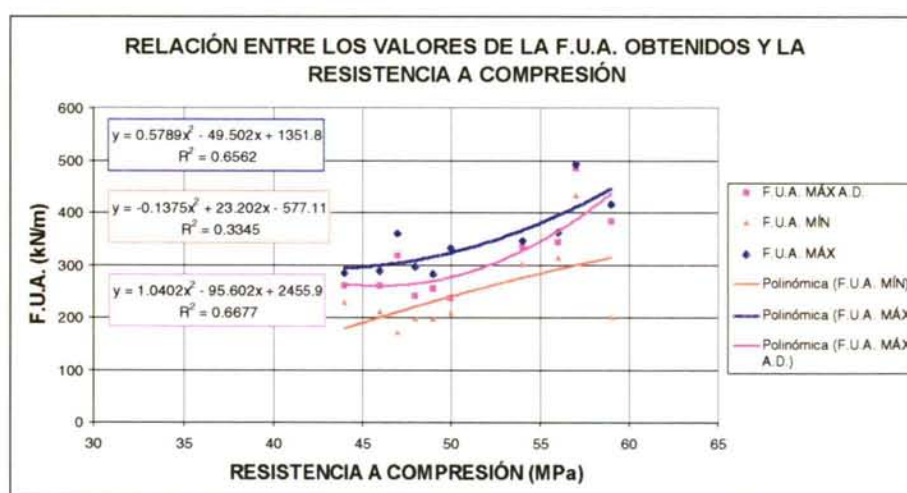
En la Tabla 6.2.3-2 se presenta el resumen comparativo de las F.U.A. obtenidas, comparando para cada ensayo los diferentes resultados, con el valor de la F.U.A. antes del deslizamiento generalizado.

En la Tabla 6.2.3-3 se resumen los valores obtenidos para cada material, promediando los resultados de ambos pórticos.

Finalmente, en la Tabla 6.2.3-4 se realiza una comparación de cada valor con el correspondiente al hormigón convencional a la edad de transferencia.

Notación:

$f_{cm,j}$	resistencia a compresión de probeta cilíndrica $\phi 15 \times 30$ cm, determinada a la edad de ensayo $j$
$f_{ctm,j}$	resistencia a tracción directa determinada a la edad de ensayo $j$
$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT.,máx,e,AD}$	fuerza unitaria de adherencia máxima, previa al deslizamiento generalizado
$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT.,mín,e,DD}$	valor mínimo de la F.U.A. tras el deslizamiento generalizado
$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT.,máx,e}$	F.U.A. máxima durante el ensayo



Gráfica 6.2.3-1



Tabla 6.2.3-1: Resumen de los resultados de los pórticos LT

Ensayo	$f_{cm,i}$	$f_{ctm,i}$	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,max}$	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,max,AD}$	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,min,DD}$	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,min,DD,DIF}$	“pull-out” durante ensayo	“pull-out” diferido
	MPa	MPa	kN/m	kN/m	kN/m		sí/no	sí/no
LT1C-2D	46	3.2	289.28	260.07	209.7	—	no	—
LT2C-2D	49	2.9	282.34	253.95	196.7	—	no	—
LT1L101-2D	44	2.8	285.85	260.39	228.00	—	no	—
LT2L101-2D	47	3	360.91	316.43	169.41	—	sí	sí
LT1L31-2D	48	3.3	297.19	239.10	196.92	—	sí	—
LT2L31-2D	50	2.5	333.65	235.12	207.14	—	sí	—
LT1C-3D	54	3.4	345.74	332.68	301.83	282.31	no	no
LT2C-3D	56	3.0	362.76	342.77	313.29	250.89	no	no
LT1L102-3D	59	3.4	415.93	382.59	199.75	199.75	sí	sí
LT2L102-3D	57	3.1	492.31	483.42	430.92	215.01	no	sí

Tabla 6.2.3-2

Ensayo	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,max}$	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,min,DD}$	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,min,DD,DIF}$	“pull-out” durante ensayo	“pull-out” diferido
	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,max,AD}$	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,max,AD}$	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,max,AD}$		
LT1C-2D	1.11	0.81		no	—
LT2C-2D	1.11	0.77		no	—
LT1L101-2D	1.10	0.88		no	—
LT2L101-2D	1.14	0.54		sí	sí
LT1L31-2D	1.24	0.82		sí	—
LT2L31-2D	1.42	0.88		sí	—
LT1C-3D	1.04	0.91	0.85	no	no
LT2C-3D	1.06	0.91	0.73	no	no
LT1L102-3D	1.09	0.52	0.52	sí	sí
LT2L102-3D	1.02	0.89	0.44	no	sí

Tabla 6.2.3-3: Resumen por material y edad de ensayo

Ensayo	$f_{cm,j}$	$f_{cm,j}$	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,máx}$	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,máx,AD}$	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,min,DD}$	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,min,DD,DIF}$
	MPa	MPa	kN/m	kN/m	kN/m	
HC 2D	47.5	3.05	285.81	257.01	203.2	
HL10-1 2D	45.5	2.9	323.38	288.41	198.705	
HL3-1 2D	49	2.9	315.42	237.11	202.03	
HC 3D	55	3.2	354.25	337.725	307.56	266.6
HL10-2 3D	58	3.25	454.12	433.005	315.335	207.38

Tabla 6.2.3-4: Resumen comparativo respecto al HC

Ensayo	$f_{cm,j}$	$f_{cm,j}$	$\frac{f_{cm,MAT,j}}{f_{cm,HC,2}}$	$\frac{f_{cm,MAT,j}}{f_{cm,HC,2}}$	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,máx,e}$	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,máx,AD}$	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,min,e,DD}$	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{HC,LT,2,min,DD}$	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,min,DD,DIF}$	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{HC,LT,3,min,DD,DIF}$
	MPa	MPa			$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{HC,LT,2,máx}$					
HC 2D	47.5	3.05	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00			
HL10-1 2D	45.5	2.9	0.96	0.95	1.13	1.12	0.98			
HL3-1 2D	49	2.9	1.03	0.95	1.10	0.92	0.99			
HC 3D	55	3.2	1.16	1.05	1.24	1.31	1.51	1.00		
HL10-2 3D	58	3.25	1.22	1.07	1.59	1.68	1.55	0.78		



En la Gráfica 6.2.3-1 se observa la relación entre los valores de F.U.A. característicos de cada ensayo y la resistencia a compresión (Tabla 6.2.3-1). Se aprecia una cierta correlación aplicando una curva de regresión cuadrática, siendo superior el grado de ajuste, expresado por el coeficiente  $R^2$ , para el valor de la F.U.A. máxima antes del deslizamiento.

Los resultados de tensiones de adherencia correspondientes a los valores de F.U.A., obtenidas con el perímetro nominal, se resumen en la Tabla 6.2.3-5:

Tabla 6.2.3-5

	Edad de transferencia	$\tau_{b,máx}^*$	$\tau_{b,máx,AD}^*$	$\tau_{b,mín,DD}^*$	$\tau_{b,mín,DD,DIF}^*$
	días	MPa	MPa	MPa	
LT1C-2D	2	6.1	5.4	4.4	
LT2C-2D	2	5.9	5.3	4.1	
LT1L101-2D	2	6.0	5.5	4.8	
LT2L101-2D	2	7.6	6.6	3.5	
LT131-2D	2	6.2	5.0	4.1	
LT231-2D	2	7.0	4.9	4.3	
LT1C-3D	3	7.2	7.0	6.3	5.9
LT2C-3D	3	7.6	7.2	6.6	5.3
LT1L102-3D	3	8.7	8.0	4.2	4.2
LT2L102-3D	3	10.3	10.1	9.0	4.5

Las tensiones de adherencia máximas obtenidas para el HC ensayado a los dos días (6.0 MPa) son inferiores a las obtenidas por Abrishami-Mitchell para un cordón de 16 mm de diámetro nominal, de 7.1 y 8.3 MPa en los dos ensayos referenciados (ABRI93). Las tensiones de adherencia máximas del HC a los 3 días, de 7.4 MPa de media, presentan una mayor similitud.

De todas formas, la fuerza inicial del cordón adoptada por Abrishami-Mitchell es considerablemente inferior a la empleada en estos ensayos: tan sólo 160 kN, lo que constituye un valor bajo, comparado con la fuerza de tesado habitual.

En todos estos ensayos se registró el giro de los transductores superior e inferior sujetos al cordón. Esto es debido a que el cordón busca su situación de mínima energía, deslizando por la hélice surcada durante el deslizamiento generalizado. Este fenómeno ya había sido apuntado por otros investigadores (TILA77, COUS86b, DENU91).

Analizando los resultados obtenidos se concluye que:

- Es conveniente realizar el estudio del comportamiento adherente diferido. Para ello, tras el final de ensayo, se trata de posponer al máximo el momento de destesado del cordón de la parte inferior. De esta forma se dispondrá de información acerca de la susceptibilidad del material a presentar fenómenos de “pull-out” diferido. Este proceso no conlleva aumento de trabajo: se trata de aprovechar al máximo el tiempo desde el final de un ensayo al principio de otro.
- La capacidad adherente instantánea de los hormigones ligeros, en términos de fuerza unitaria adherente, es en general superior a la del hormigón convencional. Sin embargo, si se mantiene la diferencia de carga en la probeta, en este material aparecen fenómenos de “pull-out” diferido, lo que no se ha observado con el HC.

- Esta mayor capacidad adherente del hormigón ligero origina un gradiente de la fuerza más elevado, lo que conlleva tensiones elevadas de tracción circunferenciales alrededor de la probeta. Si estas tensiones superan la resistencia del hormigón a tracción, se originará un fenómeno de fisuración alrededor del cordón de pretensado, que puede provocar el deslizamiento.
- La mayor capacidad adherente demostrada por la mayor parte de las probetas de HL en este ensayo no es garantía de un buen comportamiento en elementos pretensados, sino que pone en evidencia la necesidad de diseñar cuidadosamente las zonas de anclaje próximas al extremo, garantizando el confinamiento del hormigón, para evitar la fisuración.
- El recubrimiento del cordón de pretensado en este ensayo es superior al recubrimiento adoptado en piezas prefabricadas. Para recubrimientos menores, próximos al real, el campo de tensiones circunferenciales de tracción podría desencadenar la fisuración por hendimiento en la probeta.
- El ensayo resulta sencillo y seguro, y fácilmente reproducible. Las dispersiones obtenidas son en general bajas entre ensayos repetidos, excepto en los pórticos del último material, HL10-2.
- Se aprecia que la capacidad adherente del hormigón convencional a los tres días del hormigonado es considerablemente superior a la que presenta este material a los dos días.
- Aparentemente, la capacidad adherente del HL3 es ligeramente inferior a la que presenta el HL10.
- El hormigón HL10-2 presenta una mejora considerable de las resistencias a compresión y tracción, y de las propiedades adherentes, si bien presenta tendencia a fenómenos de deslizamiento diferido.
- Para valores elevados de deslizamiento, de varios milímetros se alcanza una F.U.A., en algunos casos superior a la que se produce antes del deslizamiento. Este efecto creemos que está motivado por el efecto Hoyer, (debido al módulo de Poisson del acero), y por la adherencia mecánica del cordón debida a su forma: al transferirse el pretensado se produce un efecto de “bulbo”, es decir, una rectificación de la espiral que describen los alambres, que mejora la capacidad adherente.

## **6.3. ENSAYO DE SIMULACIÓN DE COMPORTAMIENTO ADHERENTE EN LA ZONA COMPLEMENTARIA A TRACCIÓN**

### **6.3.1. INTRODUCCIÓN**

Para la realización de este ensayo, como se explica en el Capítulo 5, se hormigona una probeta cilíndrica alrededor de un cordón de pretensado tesado a una carga inicial,  $P_0$ .



Este ensayo pretende simular el comportamiento de un cordón de pretensado en la zona complementaria a tracción. Se busca una aproximación de la longitud complementaria a tracción, necesaria para que el cordón de pretensado pueda desarrollar su tensión de cálculo.

Cuanto menor sea la fuerza de pretensado transferida,  $P(t)$ , mayor será esta distancia necesaria para completar la longitud de anclaje. En este ensayo se ha adoptado un valor de la fuerza inicial del cordón de 160 kN, lo que equivale a considerar unas pérdidas de pretensado respecto a la tensión máxima de tesado admitida por la EHE de forma permanente de aproximadamente un 20% (EHE98).

El ensayo consiste en aumentar la fuerza inferior, hasta que se produzca el deslizamiento generalizado, o bien se alcance el límite elástico del cordón. Una vez finalizado el proceso, en los primeros ensayos realizados se procedía a reducir paulatinamente la fuerza superior, hasta anularla, para evaluar la capacidad adherente residual frente a deslizamientos desde la zona de transmisión. Finalmente, se destesaba inferiormente.

En los últimos ensayos realizados se optó por mantener la carga durante el mayor tiempo posible, hasta la realización del siguiente ensayo, a fin de estudiar el comportamiento diferido. Esto permite determinar la tendencia de este material a presentar fenómenos adherentes diferidos: deslizamientos diferidos o hendimiento de la probeta en este período. El hendimiento en este caso es poco probable debido al elevado recubrimiento del cordón en las probetas (67 mm de recubrimiento neto).

A la hora de analizar el comportamiento diferido habrá que tener en cuenta la interacción de:

- Los efectos diferidos del hormigón: retracción y fluencia de la probeta. La deformación por fluencia del hormigón es reducida, puesto que la tensión de compresión longitudinal de la probeta no supera los 7 MPa, lo que supone un 13% de la resistencia a compresión. El acortamiento de la probeta por retracción y fluencia producirá una redistribución de la fuerza superior e inferior del cordón.
- La relajación del pretensado. La longitud del cordón entre ambos anclajes permanece constante (si suponemos que las cuñas no deslizan en el pote). Con el tiempo se producirá una pérdida de la fuerza del cordón generalizada, que se distribuirá entre la parte superior e inferior del cordón dependiendo de la rigidez de la placa.
- Las variaciones de temperatura.
- El deslizamiento progresivo del cordón dentro de la probeta: tras el deslizamiento generalizado el cordón de pretensado tenderá a compensar la fuerza de pretensado superior e inferior, disipando fuerza inferior y aumentando fuerza superior. Por ello se produce una tendencia del cordón a deslizar en sentido descendente.

La edad de ensayo debería coincidir con la edad prevista de puesta en carga, o una cota inferior de la misma. La edad mínima de puesta en carga corresponde a la edad en que se alcance la resistencia de proyecto. Sin embargo, se ha adoptado una edad de ensayo coincidente con la edad de transferencia, debido a que:

- Por tratarse de hormigones de endurecimiento rápido (EHE98, véase Capítulo 4) las resistencias a la edad de transferencia suponen un porcentaje elevado de las resistencias alcanzadas a los 28 días, superior al 80% (véase el Capítulo 4). Realmente, al ensayar a la edad de transferencia estamos realizando el ensayo en condiciones más desfavorables que las reales, para valores de resistencias más bajos.
- Estos ensayos se plantean en términos relativos: se dispone de un material de propiedades adherentes ampliamente contrastadas, el HC, y se busca estudiar el comportamiento de hormigones fabricados con una cantidad similar del mismo tipo de cemento (HL3-1, HL10-1, HL10-2), por lo que los procesos de fraguado y endurecimiento tendrán una duración similar.
- La edad de puesta en carga presenta una tendencia a disminuir en elementos prefabricados, puesto que una de las principales ventajas de esta solución es el ahorro en plazo.

### 6.3.2. ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS LC

#### 6.3.2.1. Pórticos LC1LC-2D y LC2LC-2D

En la Tabla 6.3.2.1-1 se especifica el material y la edad de ensayo de ambos pórticos.

Tabla 6.3.2.1-1

Nombre del ensayo	Material	Edad de ensayo (días)
LC1LC-2D y LC2LC-2D	HC	2

En las Gráficas 6.3.2.1-1 a 6.3.2.1-8 se aprecia que aparentemente existe una cierta dispersión entre los dos ensayos realizados, a partir del deslizamiento generalizado.

En la Gráfica 6.3.2.1-1 se puede observar que el inicio del ensayo corresponde aproximadamente a una fuerza superior igual a la inferior, de 160 kN en ambos casos. Durante la primera fase, anterior al deslizamiento generalizado se aprecia un comportamiento marcadamente lineal. Teóricamente, durante la primera fase de adherencia perfecta (de la probeta en su conjunto, no ha habido deslizamiento generalizado) la recta resultante debería ser horizontal. Esto sucedería si la probeta estuviese apoyada en una placa infinitamente rígida. En este caso se aprecia una ligera pendiente de la rama inicial de la curva debido a la flecha adquirida por la placa durante el ensayo.

Se observa cómo, llegado un momento, se produce una incurvación de la ley que conlleva un aumento de la pendiente, debido al deslizamiento generalizado. En las fases anterior y posterior al deslizamiento, se registra un comportamiento marcadamente lineal, como se aprecia en la Figura 6.3.2.1-2. El final del ensayo propiamente dicho corresponde al punto superior derecho de la gráfica, donde la fuerza del cordón inferior de la probeta es máxima.

Tras el final del ensayo se procedió en este caso a reducir primero la fuerza superior, para evaluar la capacidad adherente residual frente a un posible deslizamiento de cordón de pretensado desde la zona de transmisión hacia el interior de la zona complementaria.

En la Gráfica 6.3.2.1-3 se observa el comportamiento del deslizamiento superior respecto a la fuerza en la parte superior de la probeta. Se aprecia claramente el instante



de deslizamiento generalizado. La linealidad de los tramos diferenciados, anterior y posterior al mismo, es elevada. El comportamiento de ambos pórticos es similar.

La Gráfica 6.3.2.1-4 es análoga a la anterior, excepto que se refiere a la parte inferior de la probeta. Es de destacar que no se aprecia el deslizamiento generalizado. El deslizamiento inferior es gradual, debido a que el fallo de la adherencia dentro de la probeta es progresivo, avanza hacia la parte superior hasta que se generaliza a toda la probeta.

En la Gráfica 6.3.2.1-5 se aprecia como, en la fase inicial, se registra deslizamiento inferior, sin que se produzca deslizamiento en la parte superior de la probeta (lo que implica que todavía no se ha producido deslizamiento generalizado). Tras el quiebro, correspondiente al deslizamiento generalizado, se aprecia un comportamiento lineal con pendiente ligeramente menor que la unidad, lo que implica que la variación de deslizamiento inferior (extremo de la probeta “activo”, donde se realiza el ensayo) es mayor que la variación del deslizamiento superior.

La Gráfica 6.3.2.1-6 exhibe el comportamiento de las células de carga superior e inferior respecto al tiempo medido desde el inicio del ensayo. Se aprecia que, en ambos casos se alcanzó en la parte inferior de la probeta la fuerza correspondiente al límite elástico garantizado por el fabricante, de 229 kN.

En la Gráfica 6.3.2.1-7 se aprecia el comportamiento de la F.U.A. durante el ensayo, respecto al deslizamiento superior. En este tipo de ensayos el deslizamiento generalizado viene marcado por el deslizamiento en la cara superior de la probeta, la opuesta a la zona de realización del ensayo. Se aprecia que el deslizamiento generalizado se produce, en ambos casos para una F.U.A. de 140-150 kN/m. Desde el deslizamiento generalizado hasta el final de ensayo, se registra una F.U.A. decreciente, lo que corresponde a una pérdida de adherencia. Se puede apreciar cómo en este tipo de ensayo la adherencia mecánica no tiene un efecto apreciable: aquí no se produce el efecto Hoyer sino que, por el contrario, el aumento de tensión facilita, debido al efecto Poisson, el deslizamiento del cordón a lo largo de la “huella” dejada durante el deslizamiento generalizado. Se aprecia la similitud entre ambos ensayos.

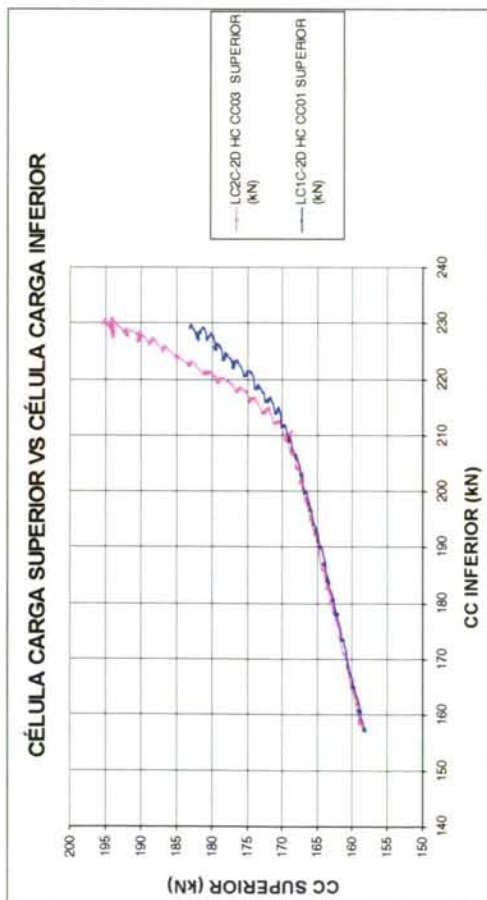
En la Gráfica 6.3.2.1-8 se presenta la F.U.A. respecto al deslizamiento inferior. Se aprecia la similitud entre ambos ensayos.

En todos estos ensayos se registró el giro de los transductores superior e inferior sujetos al cordón. Esto es debido a que el cordón busca su situación de mínima energía, deslizando por la hélice surcada durante el deslizamiento generalizado. Este fenómeno ya había sido apuntado por otros investigadores (TILA77, COUS86, DENU91).

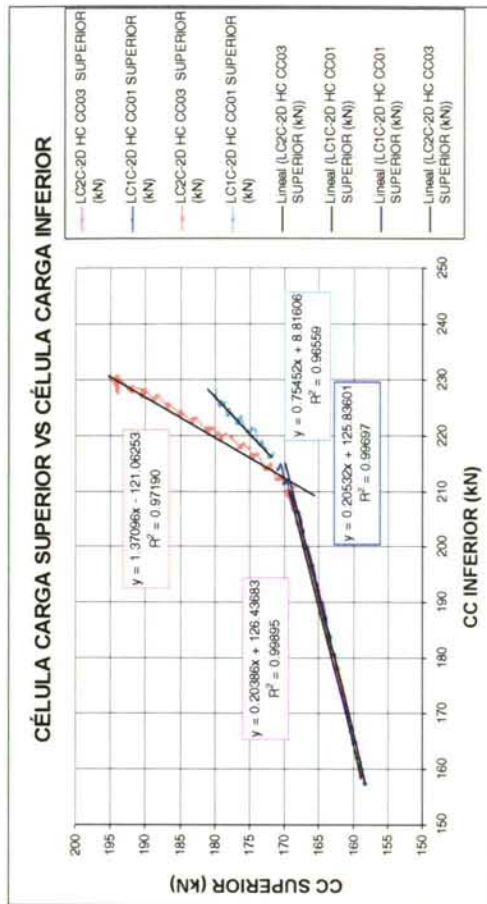
Se aprecia que los valores de la F.U.A. son considerablemente inferiores a los obtenidos en los ensayos LT de transmisión (Apartado 6.2).

En la Tabla 6.3.2.1-2 se resumen los principales resultados.

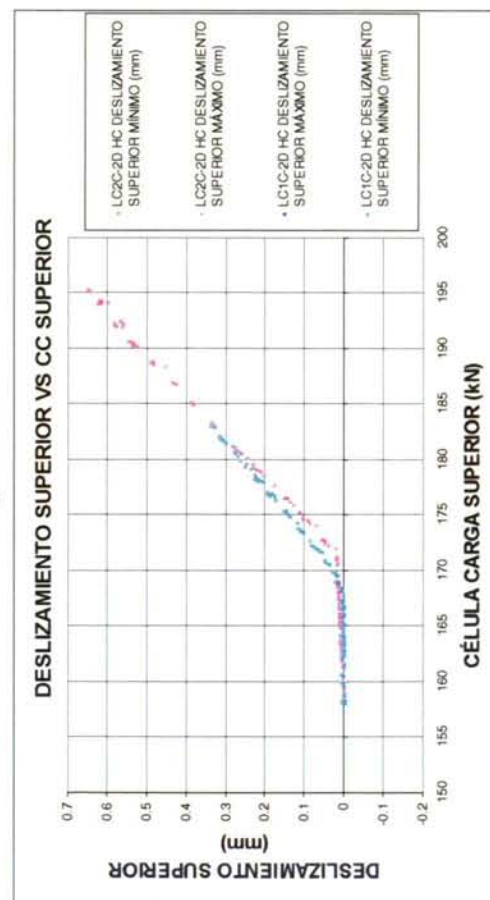
A pesar de la aparente dispersión entre ambos ensayos, analizando las Gráficas 6.3.2.1-1 a 6.3.2.1-8 se observa un comportamiento cualitativo similar en ambos casos.



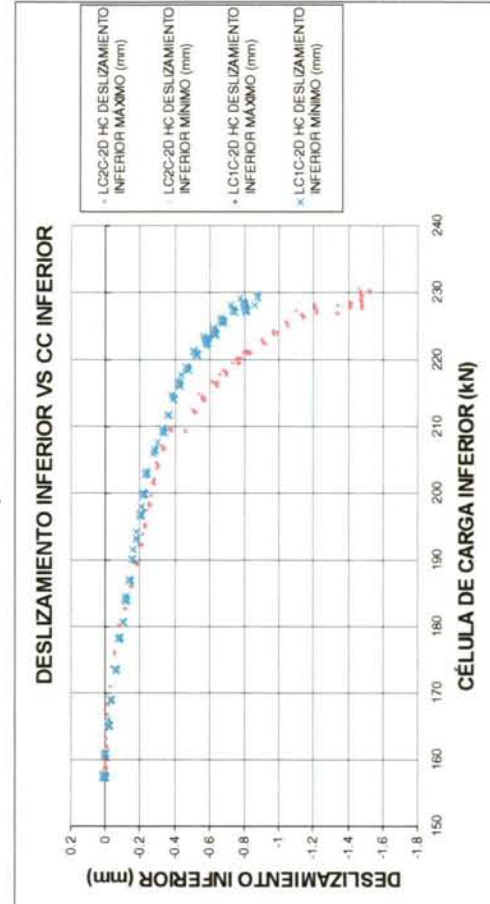
Gráfica 6.3.2.1-1



Gráfica 6.3.2.1-2

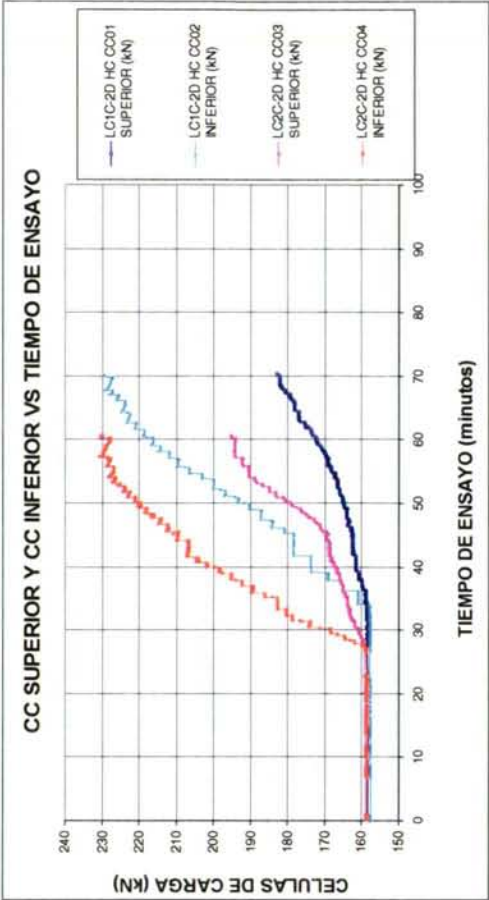


Gráfica 6.3.2.1-3

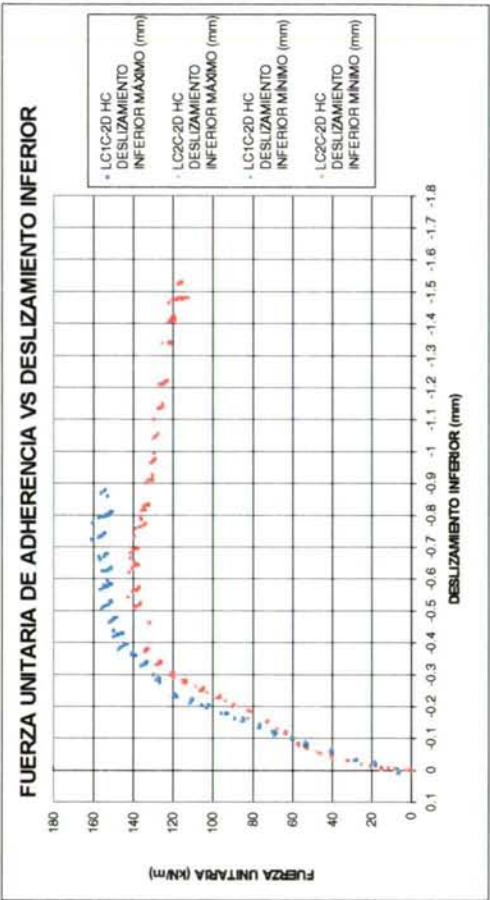


Gráfica 6.3.2.1-4

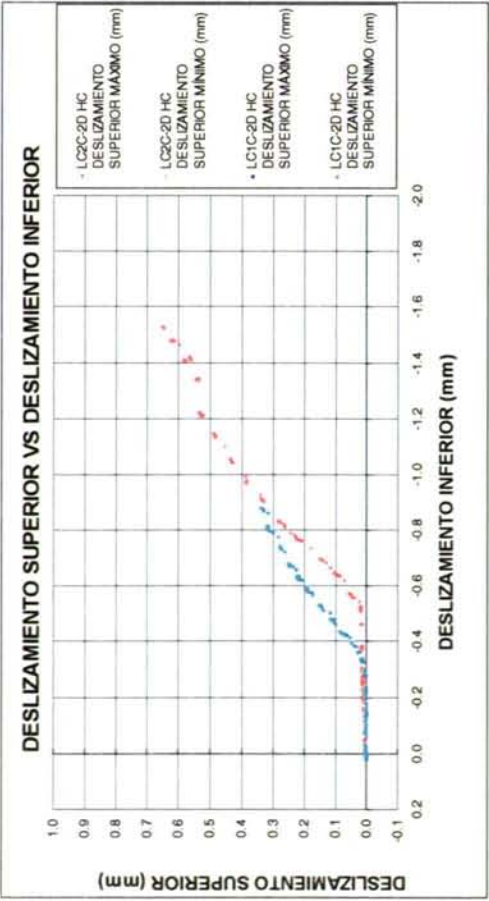




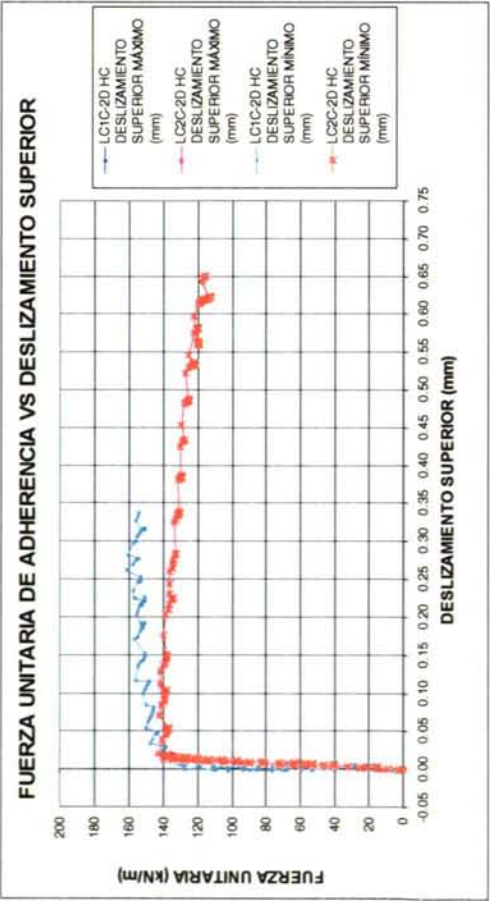
Gráfica 6.3.2.1-6



Gráfica 6.3.2.1-8



Gráfica 6.3.2.1-5



Gráfica 6.3.2.1-7

Tabla 6.3.2.1-2

Pórtico	Notación	LC1C-2D	LC2C-2D
Material		HC	HC
Fecha del hormigonado		28/10/1998	28/10/1998
Hora del fin de hormigonado		12:44	17:37
Fecha de ensayo		30/10/1998	30/10/1998
Hora del inicio del ensayo		13:55:58	18:26:27
Edad de ensayo (días)		2.05	2.03
Duración ensayo (minutos)		67.37	60.65
Duración ensayo total (días)		0.05	0.04
Límite elástico garantizado cordón (kN)		229.00	229.00
Carga inferior inicio ensayo $P(t_0)$ (kN)		157.45	158.42
Carga inferior máxima alcanzada durante el ensayo (kN)		230.60	230.74
Fuerza unitaria de adherencia máxima (kN/m)		161.17	164.32
Deslizamiento superior máximo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento superior (mm)	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC, LC, 2, máx}$		
Deslizamiento superior mínimo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento superior (mm)	$\delta_{HC, LC, 2, máx}^{MÁX}$	0.26	2.66
Fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento superior (kN/m)	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC, LC, 2, máx, AD}$	139.92	142.67
Deslizamiento superior máximo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima antes del deslizamiento generalizado (mm)	$\delta_{HC, LC, 2, máx, AD}^{MÁX}$	0.02	0.02
Deslizamiento superior mínimo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima antes del deslizamiento generalizado (mm)	$\delta_{HC, LC, 2, máx, AD}^{MÍN}$	0.02	0.02
Fuerza unitaria de adherencia mínima durante ensayo tras haberse producido deslizamiento generalizado (kN/m)	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC, LC, 2, mín, DD}$	138.84	133.90
Fuerza unitaria de adherencia mínima diferida tras haberse producido deslizamiento generalizado (kN/m)	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC, LC, 2, mín, DD, DIF}$	138.84	112.11
Tensión de compresión longitudinal máxima en la probeta (MPa) a la edad de ensayo	$\sigma_{c, máx}$	4.91	4.31
Resistencia a compresión probeta normalizada a la edad de ensayo (MPa)	$f_{cm, 2}$	52.00	49.00
Resistencia a tracción directa estimada a la edad de ensayo (MPa)	$f_{adm, 2}$	3.30	3.30



### 6.3.2.2. Pórticos LC1L101-2D y LC2L101-2D

En la Tabla 6.3.2.2-1 se especifica el material y la edad de ensayo de ambos pórticos.

Tabla 6.3.2.2-1

Nombre del ensayo	Material	Edad de ensayo (días)
LC1L101-2D/LC2L101-2D	HL10-1	2

Los ensayos de ambos pórticos presentan una gran similitud, como se aprecia en las Gráficas 6.3.2.2-1 a 6.3.2.2-8.

En las Gráficas 6.3.2.2-1 y 6.3.2.2-2 se aprecian dos fases diferenciadas del ensayo, delimitadas por el deslizamiento generalizado, que se produjo en ambos casos para un valor de la fuerza inferior de 210-215 kN aproximadamente. La linealidad de los tramos anterior y posterior al mismo es apreciable, en ambos pórticos. No se aprecia ningún “pull-out” en estos ensayos, el deslizamiento se produce de forma gradual.

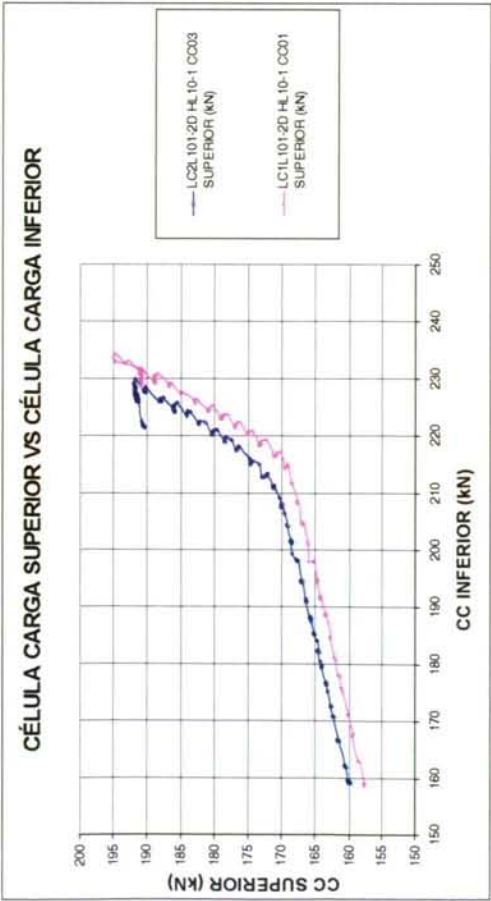
En la Gráfica 6.3.2.2-3 se observa claramente el instante del deslizamiento generalizado en ambos pórticos, cuando comienza a apreciarse deslizamiento superior. Los tramos anterior y posterior al deslizamiento presentan una linealidad clara.

En la Gráfica 6.3.2.2-5 se observa el deslizamiento superior respecto al inferior, a lo largo del ensayo. Tras el deslizamiento generalizado la pendiente de la curva se mantiene menor de la unidad, como se explicó en el Apartado 6.3.2.1.

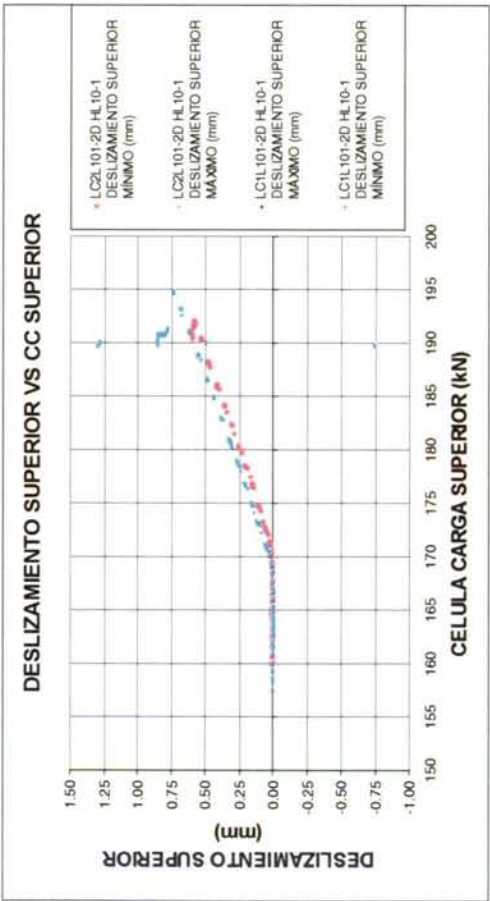
La duración de ambos ensayos fue similar, como se aprecia en la Gráfica 6.3.2.2-6. Tras la finalización del ensayo, se mantuvo la diferencia de carga durante varias horas, durante las cuales no se apreció ningún deslizamiento diferido.

En la Gráfica 6.3.2.2-7 se aprecia que, una vez alcanzada una F.U.A. de 160-140 kN/m ( $P_1$  y  $P_2$ ) se produce el deslizamiento generalizado, tras lo cual se produce un descenso paulatino de la F.U.A., que desciende hasta un valor de 120-100 kN/m ( $P_1$  y  $P_2$ ) al final del período estudiado. Como vimos en el Apartado 6.3.2.1, en este tipo de ensayos no se produce recuperación de la F.U.A., al contrario de lo sucedido en los ensayos LT, lo que prueba la mejor adherencia de la zona de transmisión.

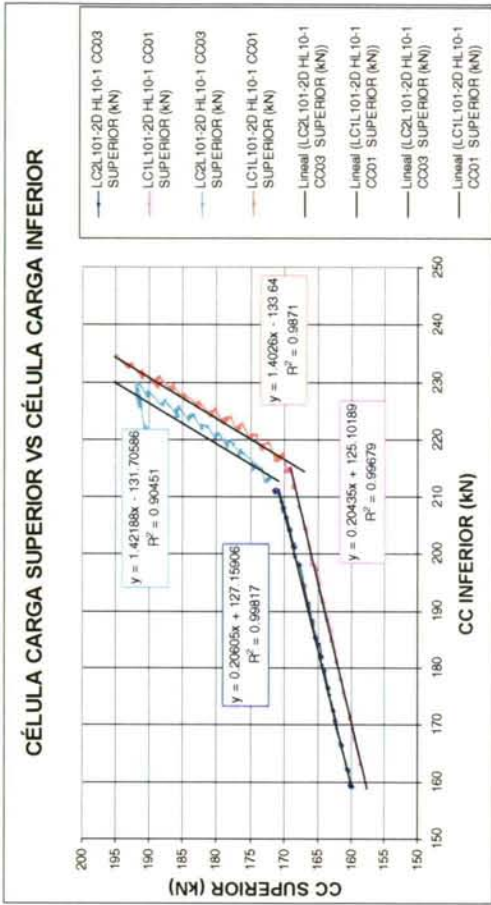
En la Tabla 6.3.2.2-2 se resumen los resultados de este ensayo.



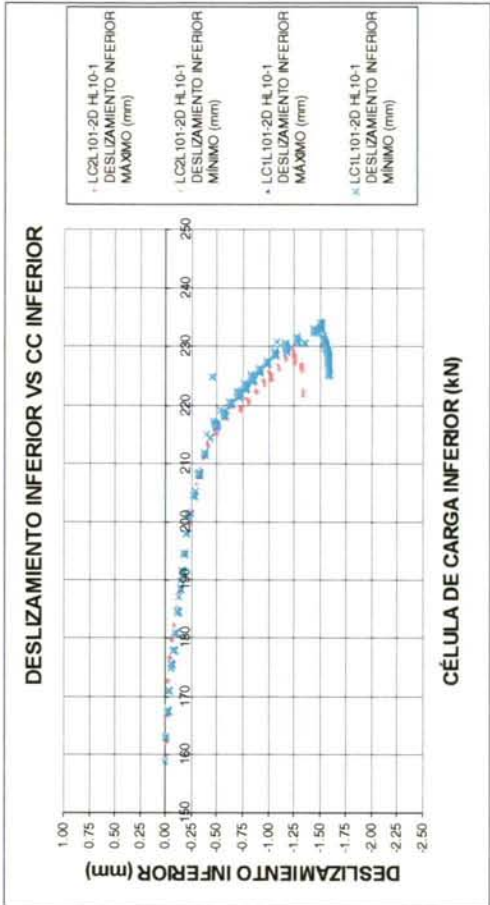
Gráfica 6.3.2.2-1



Gráfica 6.3.2.2-3

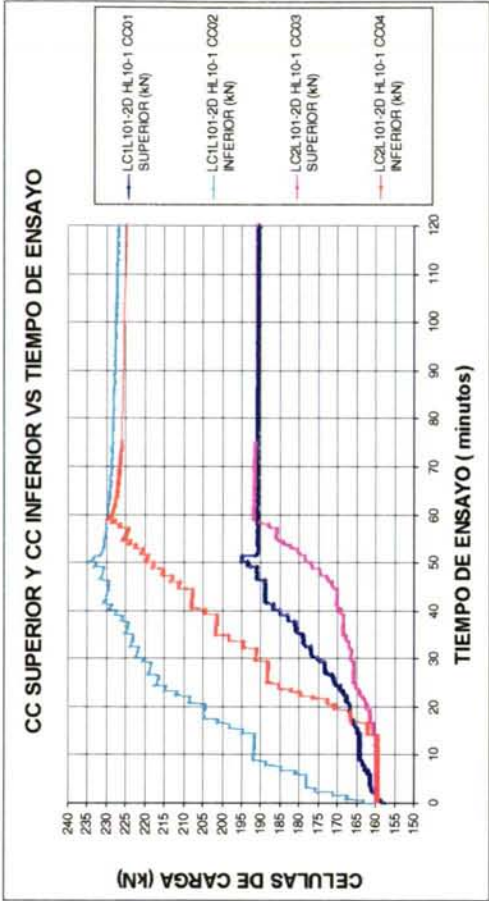


Gráfica 6.3.2.2-2

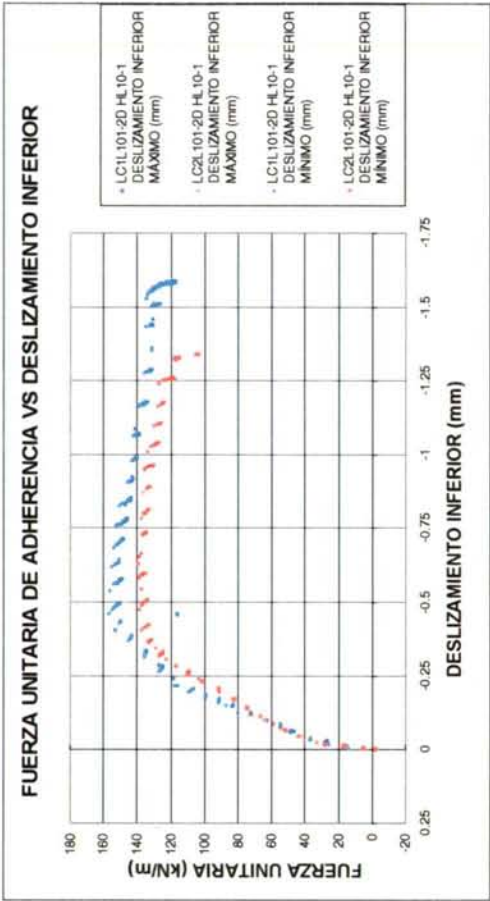


Gráfica 6.3.2.2-4

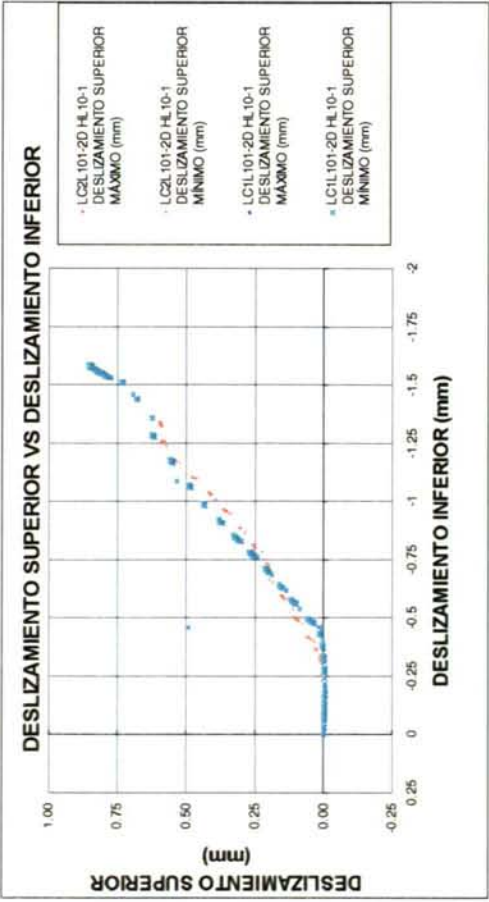




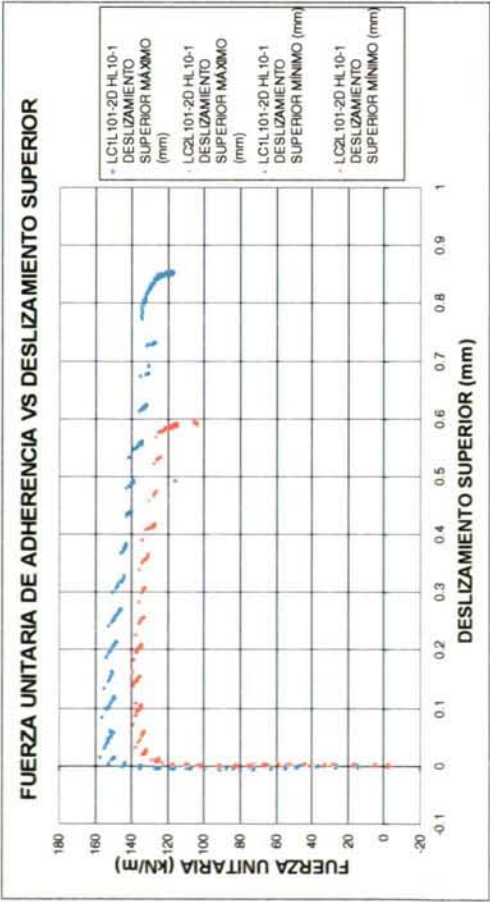
Gráfica 6.3.2.2-6



Gráfica 6.3.2.2-8



Gráfica 6.3.2.2-5



Gráfica 6.3.2.2-7

Tabla 6.3.2.2-1

Pórtico	Notación	LC1L101-2D	LC2L101-2D
Material		HL10-1	HL10-1
Fecha del hormigonado		10/11/1998	10/11/1998
Hora del fin de hormigonado		12:00	16:43
Fecha de ensayo		12/11/1998	12/11/1998
Hora del inicio del ensayo		11:44:23	16:13:37
Edad de ensayo (días)		1.99	1.979594907
Duración ensayo (minutos)		61.12	58.90
Duración ensayo total (días)		0.24	0.17
Límite elástico garantizado cordón (kN)		229.00	229.00
Carga inferior inicio ensayo $P(t_0)$ (kN)		158.83	159.27
Carga inferior máxima alcanzada durante el ensayo (kN)		234.42	229.89
Fuerza unitaria de adherencia máxima (kN/m)		157.27	142.67
	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC, LC, 2, \max}$		
Deslizamiento superior máximo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento superior (mm)	$\delta_{HC, LC, 2, \max}^{MAX}$	0.02	0.14
Deslizamiento superior mínimo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento superior (mm)	$\delta_{HC, LC, 2, \max}^{MIN}$	0.02	0.14
Fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento superior (kN/m)	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC, LC, 2, \max, AD}$	157.27	133.10
Deslizamiento superior máximo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima antes del deslizamiento generalizado (mm)	$\delta_{HC, LC, 2, \max, AD}^{MAX}$	0.02	0.02
Deslizamiento superior mínimo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima antes del deslizamiento generalizado (mm)	$\delta_{HC, LC, 2, \max, AD}^{MIN}$	0.02	0.02
Fuerza unitaria de adherencia mínima durante ensayo tras haberse producido deslizamiento generalizado (kN/m)	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC, LC, 2, \min, DD}$	130.72	123.86
Fuerza unitaria de adherencia mínima diferida tras haberse producido deslizamiento generalizado (kN/m)	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC, LC, 2, \min, DD, DIF}$	113.70	103.59
Tensión de compresión longitudinal máxima en la probeta (MPa) a la edad de ensayo	$\sigma_{c, \max}$	2.67	2.37
Resistencia a compresión probeta normalizada a la edad de ensayo (MPa)	$f_{cm, 2}$	48.57	47.60
Resistencia a tracción directa estimada a la edad de ensayo (MPa)	$f_{ctm, 2}$	2.75	2.53



### 6.3.2.3. Pórticos LC1L31-2D y LC2L31-2D

En la Tabla 6.3.2.3-1 se especifica el material y la edad de ensayo de ambos pórticos.

Tabla 6.3.2.3-1

Nombre del ensayo	Material	Edad de ensayo (días)
LC1L31-2D/LC2L31-2D	HL3-1	2

En la Gráfica 6.3.2.3-1 se aprecian claramente tres fases. Las fases anterior y posterior al deslizamiento generalizado, el cual se produce en ambos casos para una fuerza inferior de 220 kN aproximadamente. Tras el deslizamiento se produce la fase de adherencia residual hasta el final del ensayo. Se aprecia que en ambos ensayos se alcanzó el valor del límite elástico garantizado por el fabricante del cordón (véase Capítulo 4), si bien en el pórtico 2 se superó este valor. La tercera parte de la curva, que corresponde a un descenso de las fuerzas superior e inferior es sensiblemente paralela a la fase 1. Esta fase corresponde a los valores diferidos de las horas siguientes a la finalización del ensayo. La linealidad de las dos primeras fases se aprecia en la Gráfica 6.3.2.3-2.

En las Gráficas 6.3.2.3-1 a 6.3.2.3-5 se observa que en uno de los pórticos, el pórtico 1, durante el ensayo se sobrepasó el límite elástico garantizado del cordón en la parte inferior. A pesar de eso se observa que la similitud cualitativa de comportamiento de ambos pórticos.

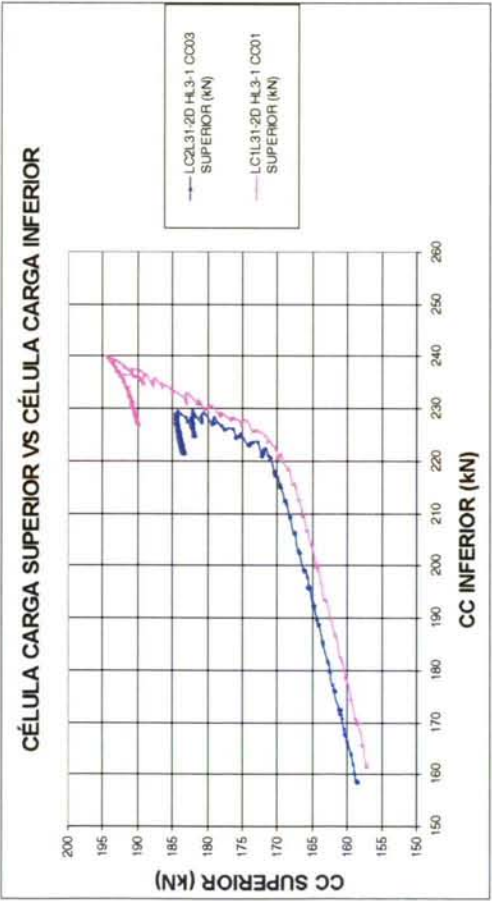
La duración del ensayo se observa en la Gráfica 6.3.2.3-6, en la que queda patente que es posible acompañar la duración de ambos ensayos, a pesar de realizarse la carga mediante un proceso manual.

En la Gráfica 6.3.2.3-7 se aprecia que en ambos pórticos una vez alcanzada una F.U.A. de 175-170 kN/m ( $P_1$  y  $P_2$ ) se produce el deslizamiento generalizado, tras lo cual se produce un descenso paulatino de la F.U.A., que desciende hasta un valor de 120 kN/m ( $P_1$  y  $P_2$ ) al final del período estudiado.

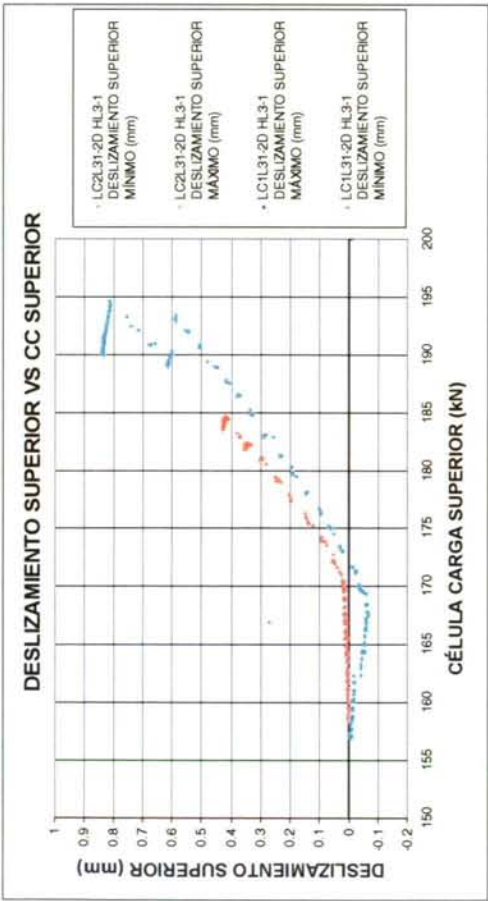
En este caso, al igual que lo observado en los Apartados 6.3.2.1 y 6.3.2.2, no se produce recuperación de la F.U.A., al contrario de lo que ocurría en los ensayos LT. Se observa que tras la finalización del ensayo propiamente dicho, durante las horas posteriores se produce una pérdida del valor de la F.U.A. acusado, desde 150 a 120 kN/m aproximadamente en ambos pórticos.

En la Gráfica 6.3.2.3-8 se aprecia la similitud entre ambos ensayos, hasta que se alcanza la F.U.A. máxima. A partir de ese instante se produce un deslizamiento superior en el pórtico 1. Sin embargo, los valores de la F.U.A son similares a lo largo de todo el ensayo.

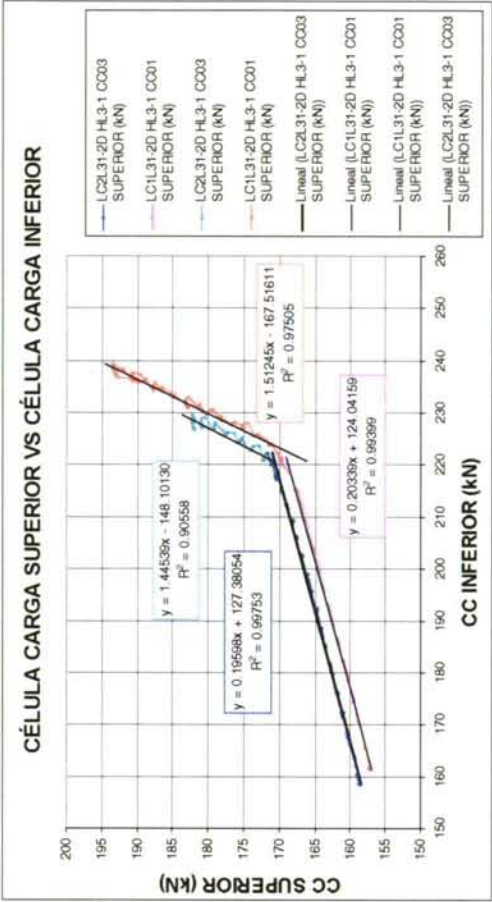
En la Tabla 6.3.2.3-2 se resumen los principales resultados.



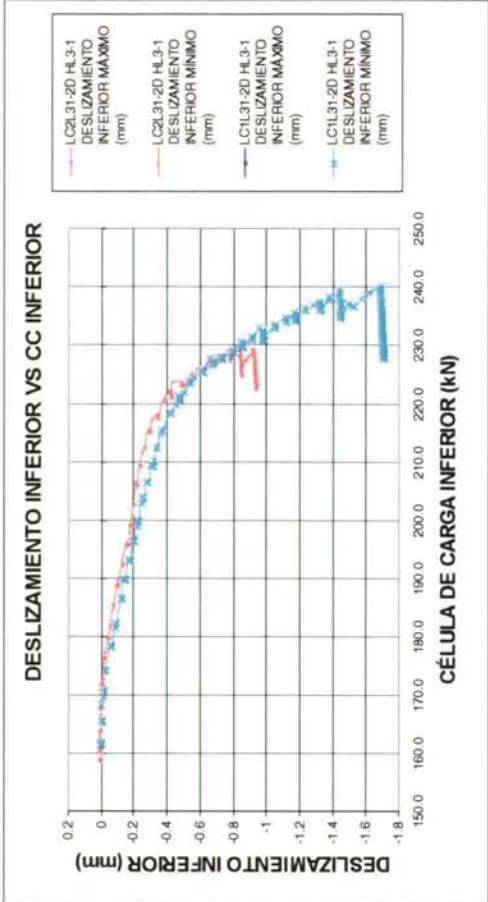
Gráfica 6.3.2.3-1



Gráfica 6.3.2.3-3

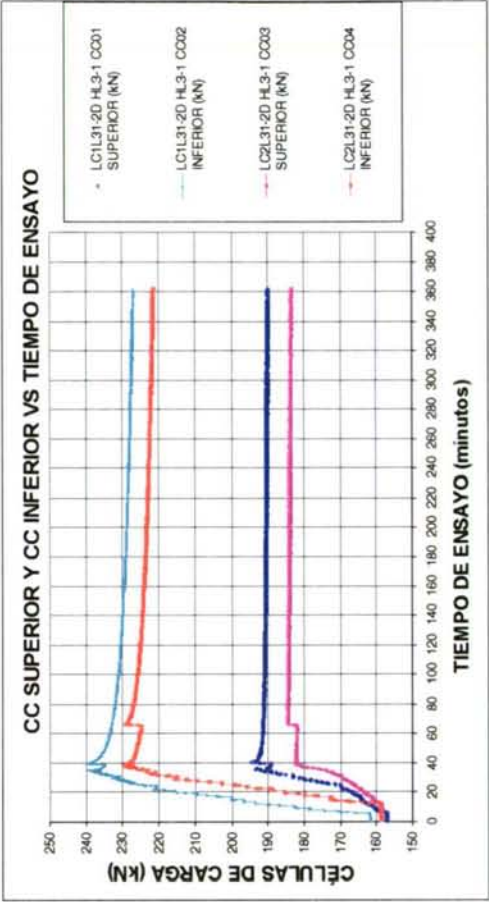


Gráfica 6.3.2.3-2

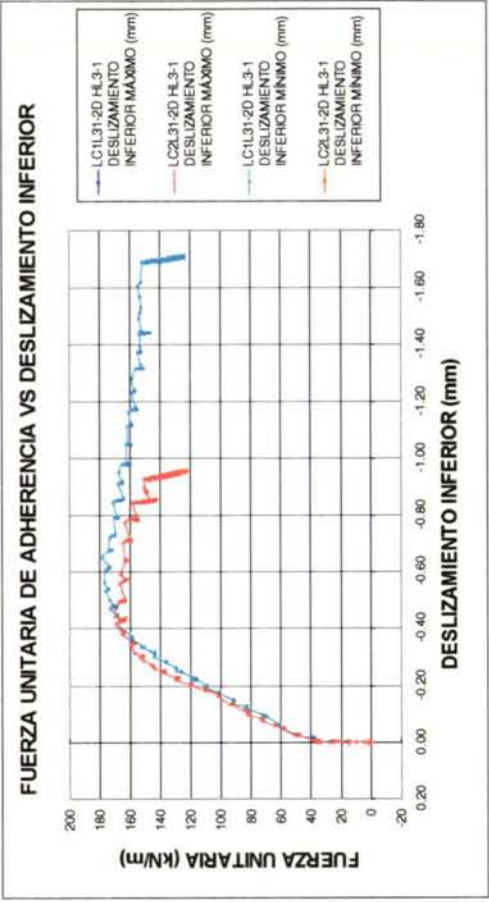


Gráfica 6.3.2.3-4

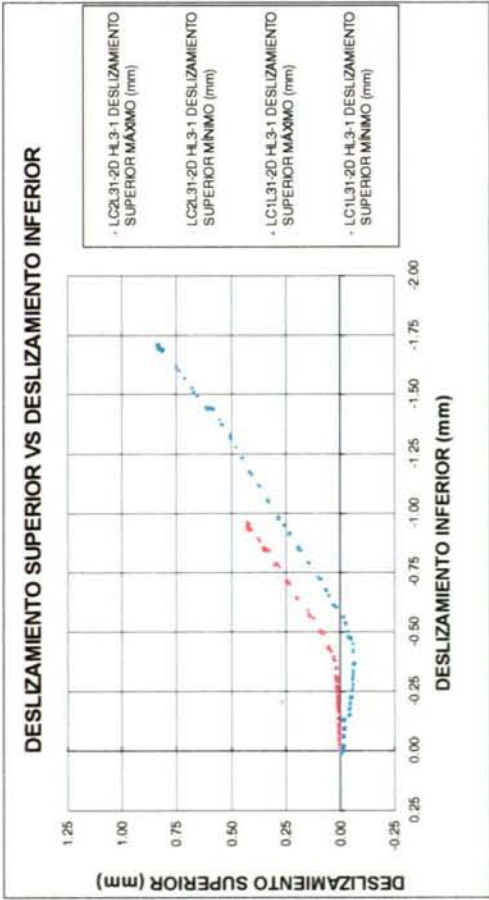




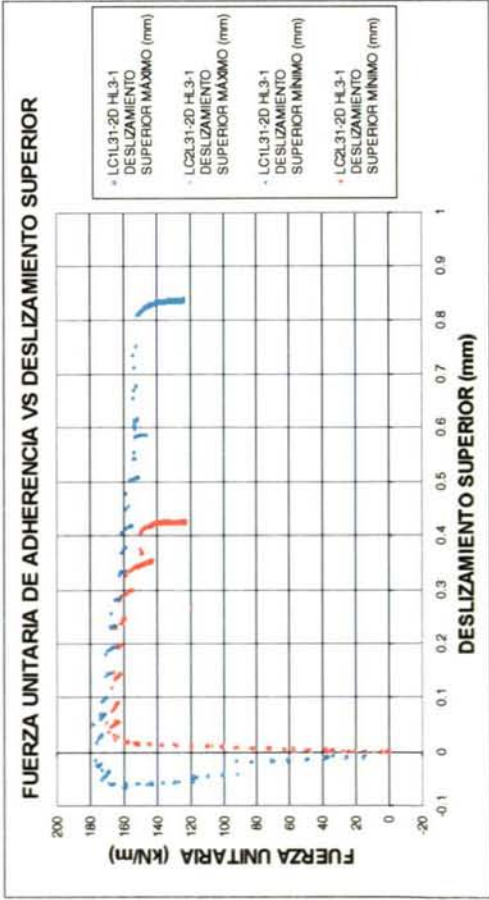
Gráfica 6.3.2.3-6



Gráfica 6.3.2.3-8



Gráfica 6.3.2.3-5



Gráfica 6.3.2.3-7

Tabla 6.3.2.3-1

Pórtico	Notación	LC1L31-2D	LC2L31-2D
Material		HL3-1	HL3-1
Fecha del hormigonado		16/11/1998	17/11/1998
Hora del fin de hormigonado		18:01	13:27
Fecha de ensayo		18/11/1998	19/11/1998
Hora del inicio del ensayo		17:55:52	13:23:12
Edad de ensayo (días)		2.00	2.00
Duración ensayo (minutos)		48.42	39.10
Duración ensayo total (días)		0.25	0.36
Límite elástico garantizado cordón (kN)		248.00	259.00
Carga inferior inicio ensayo $P(t_0)$ (kN)		161.50	158.64
Carga inferior máxima alcanzada durante el ensayo (kN)		240.16	229.57
Fuerza unitaria de adherencia máxima (kN/m)	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC, LC, 2, \max}$	177.83	169.67
Deslizamiento superior máximo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento superior (mm)	$\delta_{HC, LC, 2, \max}^{MAX}$	0.11	0.05
Deslizamiento superior mínimo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento superior (mm)	$\delta_{HC, LC, 2, \max}^{MIN}$	0.11	0.05
Fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento superior (kN/m)	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC, LC, 2, \max, AD}$	176.06	165.06
Deslizamiento superior máximo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima antes del deslizamiento generalizado (mm)	$\delta_{HC, LC, 2, \max, AD}^{MAX}$	0.02	0.02
Deslizamiento superior mínimo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima antes del deslizamiento generalizado (mm)	$\delta_{HC, LC, 2, \max, AD}^{MIN}$	0.02	0.02
Fuerza unitaria de adherencia mínima durante ensayo tras haberse producido deslizamiento generalizado (kN/m)	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC, LC, 2, \min, DD}$	146.31	144.12
Fuerza unitaria de adherencia mínima diferida tras haberse producido deslizamiento generalizado (kN/m)	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC, LC, 2, \min, DIF}$	123.26	122.07
Tensión de compresión longitudinal máxima en la probeta (MPa) a la edad de ensayo	$\sigma_{c, \max}$	3.02	2.88
Resistencia a compresión probeta normalizada a la edad de ensayo (MPa)	$f_{cm, 2}$	49.00	50.00
Resistencia a tracción directa estimada a la edad de ensayo (MPa)	$f_{ctm, 2}$	2.60	2.70



#### 6.3.2.4. Pórticos LC1C-3D y LC2C-3D

En la Tabla 6.3.2.4-1 se especifica el material y la edad de ensayo de ambos pórticos.

Tabla 6.3.2.4-1

Nombre del ensayo	Material	Edad de ensayo (días)
LC1C-3D/LC2C-3D	HC	3

En la Gráfica 6.3.2.4-1 se aprecia que el deslizamiento generalizado sucede para una carga inferior de 200-205 kN en ambos casos. Como se aprecia en la Gráfica 6.3.2.4-2 la fase de adherencia residual presenta un ajuste mejor con la recta de regresión en el pórtico 2 que en el 1.

En la Gráfica 6.3.2.4-3, en la que se representa el deslizamiento superior respecto a la fuerza superior en el cordón, se aprecia una cierta dispersión de ambos ensayos, si bien, tras el deslizamiento generalizado, las curvas presentan una gran similitud. Analizando la misma gráfica, pero correspondiente a la parte inferior de la probeta se aprecia un comportamiento similar (Gráfica 6.3.2.4-4).

En la Gráfica 6.3.2.4-5 se observa el comportamiento del deslizamiento superior respecto al inferior. Tras el deslizamiento generalizado se aprecia una segunda fase sensiblemente lineal, que presenta la misma pendiente en ambos pórticos. La pendiente es ligeramente inferior a la unidad (lo que implica mayor deslizamiento inferior que superior).

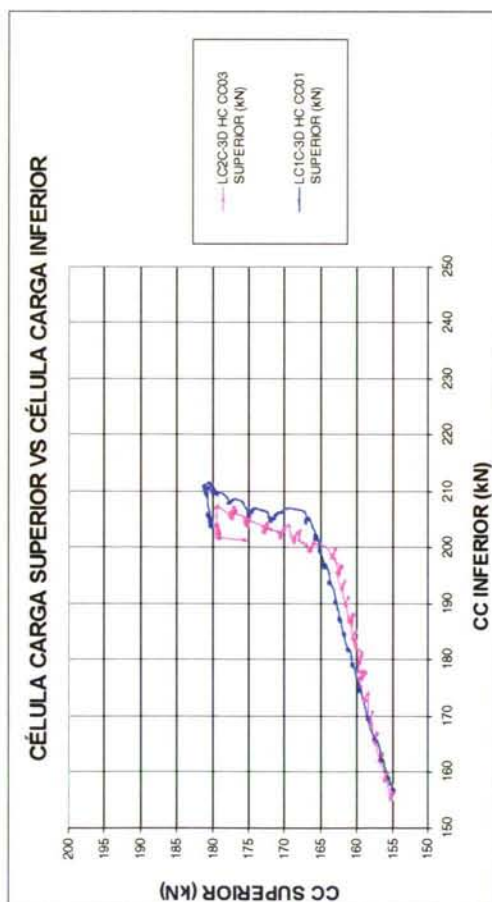
Si observamos la Gráfica 6.3.2.4-6 se aprecia que ambos ensayos tuvieron una duración parecida. De hecho, a pesar de que la variación de carga se efectúa de manera manual, se podría sistematizar con facilidad el ensayo para que la duración sea aproximadamente la misma.

En la Gráfica 6.3.2.4-7 se aprecia que se alcanza una F.U.A. de 130 kN/m antes de producirse el deslizamiento generalizado, en ambos casos. Tras el mismo se aprecia un descenso de la fuerza unitaria hasta 75-80 kN/m. Se observa que tras la conclusión del ensayo no se produce una pérdida del valor de la F.U.A. tan acusado como en la misma gráfica del Apartado 6.3.2.3.

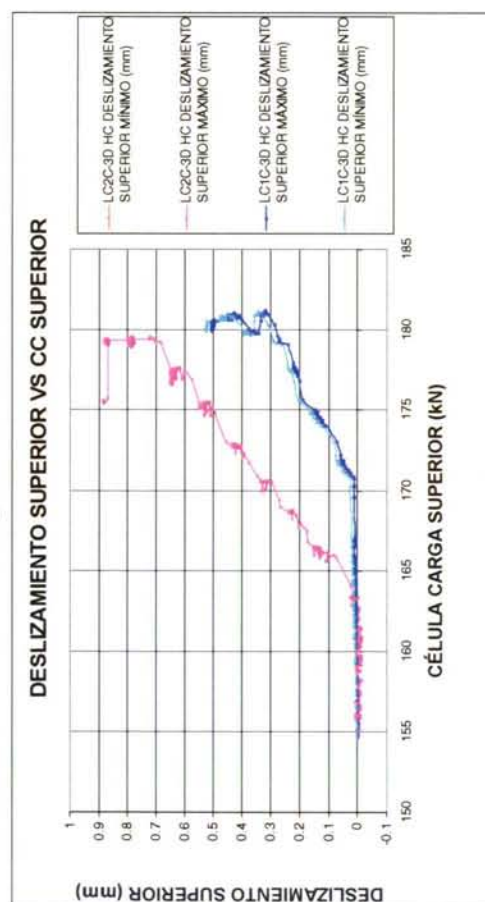
Respecto a la Gráfica 6.3.2.4-8, se pone de manifiesto la similitud del comportamiento adherente en la parte inferior de la probeta, en ambos pórticos.

A la vista de la Gráfica 6.3.2.4-9 se aprecia que, tras la finalización del ensayo propiamente dicho, durante los días siguientes no se produjo deslizamiento diferido. Se aprecia el ligero descenso de carga de la parte inferior y superior de cada pórtico, debido probablemente al efecto conjunto de la relajación y, en segundo lugar, las deformaciones diferidas del hormigón.

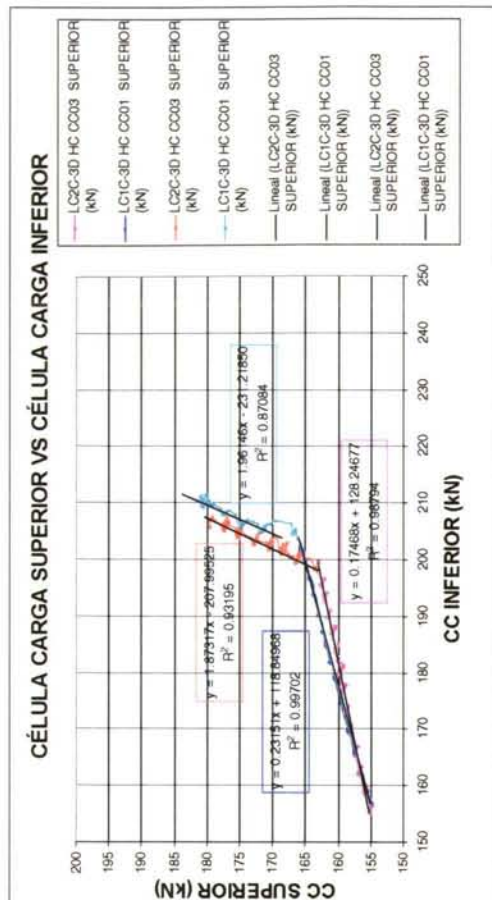
En la Tabla 6.3.2.4-2 se resumen los resultados obtenidos.



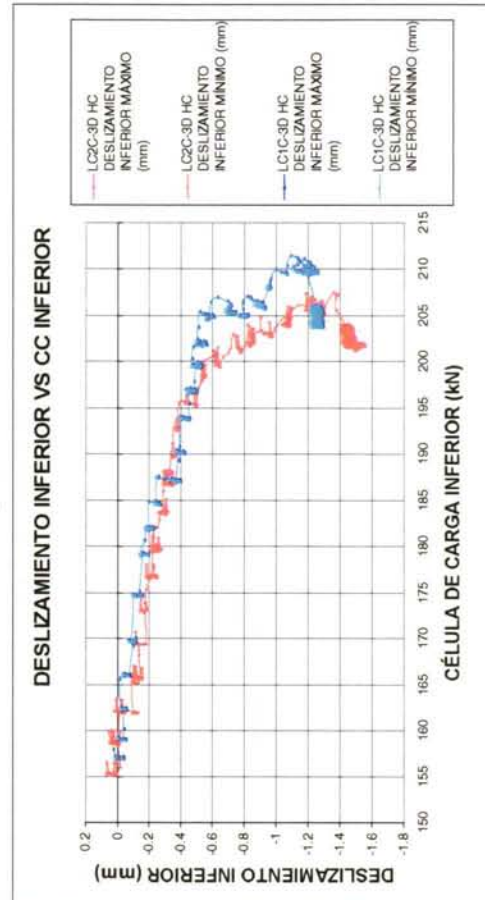
Gráfica 6.3.2.4-1



Gráfica 6.3.2.4-3

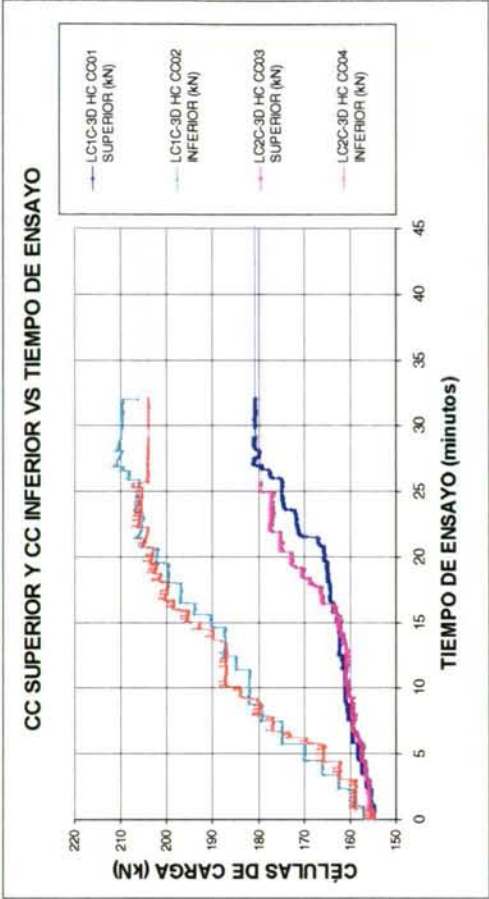


Gráfica 6.3.2.4-2

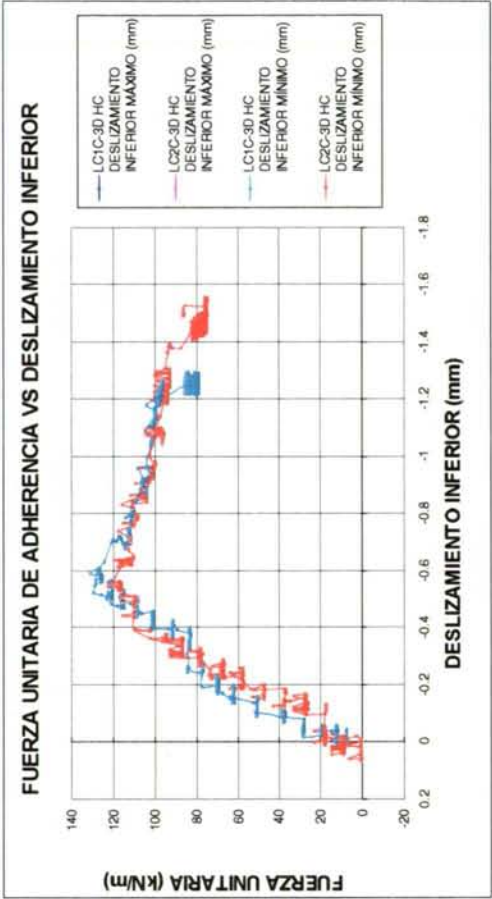


Gráfica 6.3.2.4-4

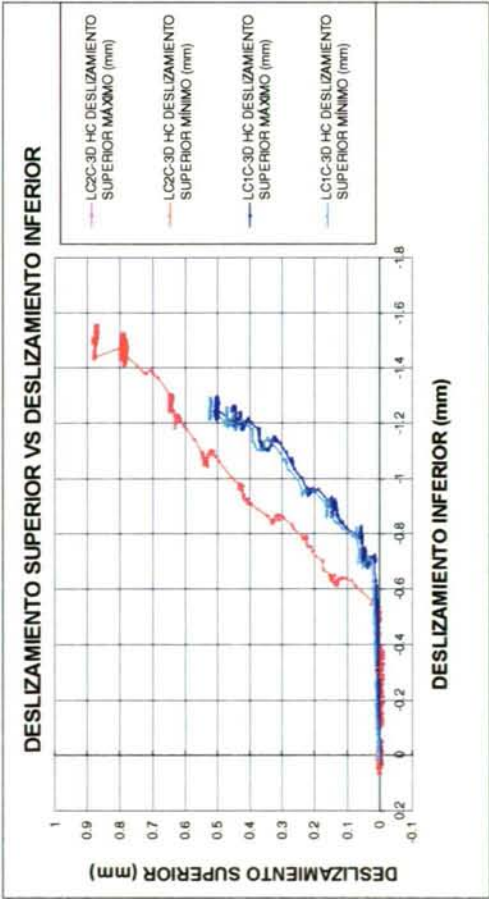




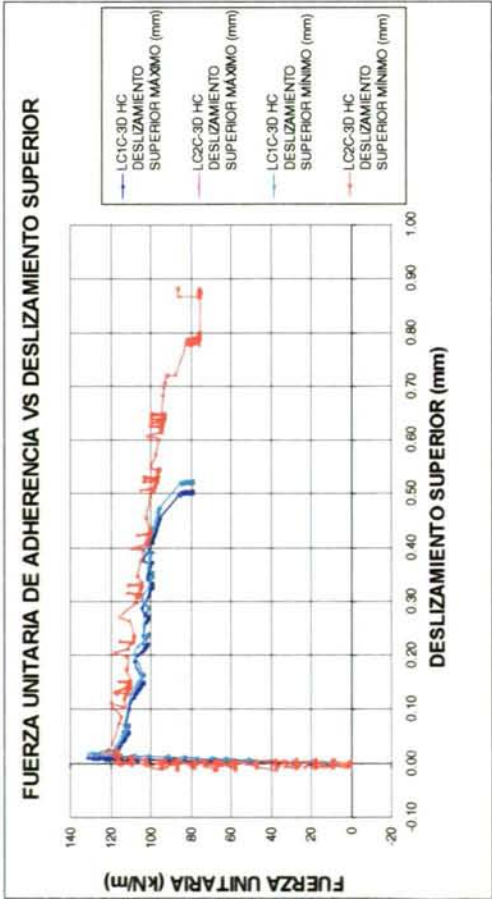
Gráfica 6.3.2.4-6



Gráfica 6.3.2.4-8



Gráfica 6.3.2.4-5

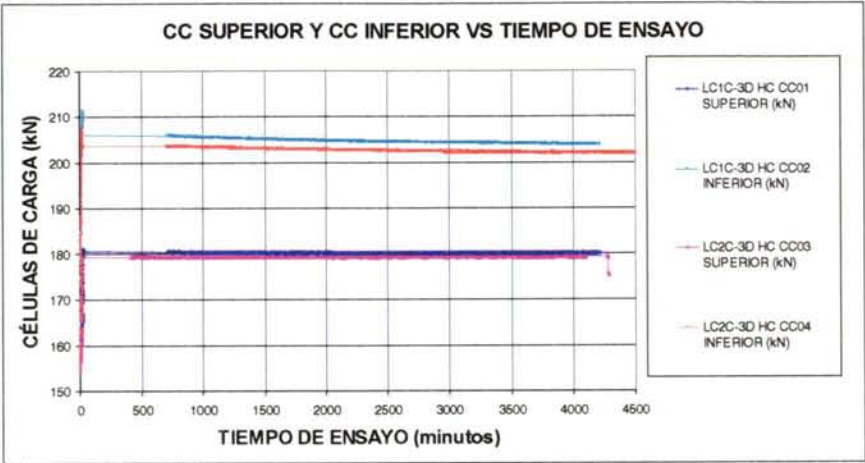


Gráfica 6.3.2.4-7

Tabla 6.3.2.4-1

Pórtico	Notación	LC1C-3D	LC2C-3D
Material		HC	HC
Fecha del hormigonado		14/03/2000	14/03/2000
Hora del fin de hormigonado		12:45	17:12
Fecha de ensayo		17/03/2000	17/03/2000
Hora del inicio del ensayo		12:17:20	17:08:55
Edad de ensayo (días)		2.98	3.00
Duración ensayo (minutos)		28.18	24.93
Duración ensayo total (días)		2.93	2.98
Límite elástico garantizado cordón (kN)		229.00	229.00
Carga inferior inicio ensayo $P(t_0)$ (kN)		157.24	155.22
Carga inferior máxima alcanzada durante el ensayo (kN)		211.57	207.41
Fuerza unitaria de adherencia máxima (kN/m)	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC,LC,3,max}$	131.07	122.36
Deslizamiento superior máximo para fuerza unitaria de adherencia máxima alcanzada durante el ensayo (kN)	$\delta_{HC,LC,3,max}^{MAX}$	0.01	0.02
Deslizamiento superior mínimo para fuerza unitaria de adherencia máxima alcanzada durante el ensayo (kN)	$\delta_{HC,LC,3,max}^{MIN}$	0.02	0.02
Fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento superior (kN/m)	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC,LC,3,max,AD}$	118.30	119.96
Deslizamiento superior máximo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento superior (kN/m)	$\delta_{HC,LC,3,max,AD}^{MAX}$	0.01	0.02
Deslizamiento superior mínimo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento superior (kN/m)	$\delta_{HC,LC,3,max,AD}^{MIN}$	0.02	0.02
Fuerza unitaria de adherencia mínima durante ensayo tras haberse producido deslizamiento generalizado (kN/m)		98.79	92.60
Fuerza unitaria de adherencia mínima diferida tras haberse producido deslizamiento generalizado (kN/m)		78.61	74.53
Tensión de compresión longitudinal máxima en la probeta (MPa) a la edad de ensayo	$\sigma_{c,max}$	2.23	2.08
Resistencia a compresión probeta normalizada a la edad de ensayo (MPa)	$f_{cm,3}$	54.15	55.50
Resistencia a tracción directa a la edad de ensayo (MPa)	$f_{ctm,3}$	3.15	3.27





Gráfica 6.3.2.4-9

6.3.2.5. Pórticos LC1L102-3D y LC2L102-3D

En la Tabla 6.3.2.5-1 se especifica el material y la edad de ensayo de ambos pórticos.

Tabla 6.3.2.5-1

Nombre del ensayo	Material	Edad de ensayo (días)
LC1L102-3D LC2L102-3D	HL10-2	3

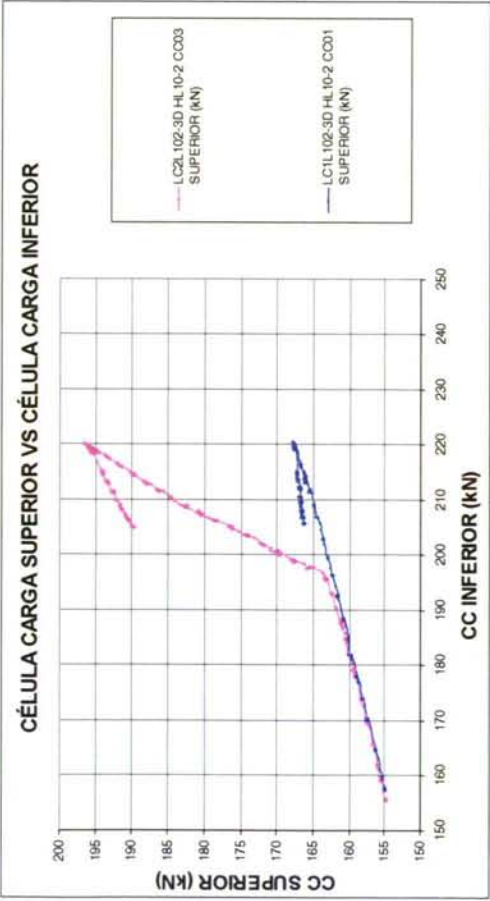
De todos los ensayos de este tipo realizados, estos son los que presentan una mayor dispersión. En la Gráfica 6.3.2.5-1 se aprecia que durante el ensayo del pórtico 1, no se produjo deslizamiento. El pórtico 2 sufrió deslizamiento generalizado cuando la fuerza inferior era de 195 kN. La primera fase de ambos ensayos, correspondiente a la adherencia perfecta, es muy similar. En la Gráfica 6.3.2.5-2 se aprecia la elevada linealidad de las fases de cada ensayo. Tras la finalización del ensayo se mantuvo la carga durante 17 días, para observar si se producía deslizamiento diferido.

En las Gráficas 6.3.2.5-3, 6.3.2.5-4, 6.3.2.5-5 y 6.3.2.5-8 se observa que la fase inicial del ensayo es muy similar en ambos pórticos, hasta que se produce el deslizamiento generalizado del pórtico 2.

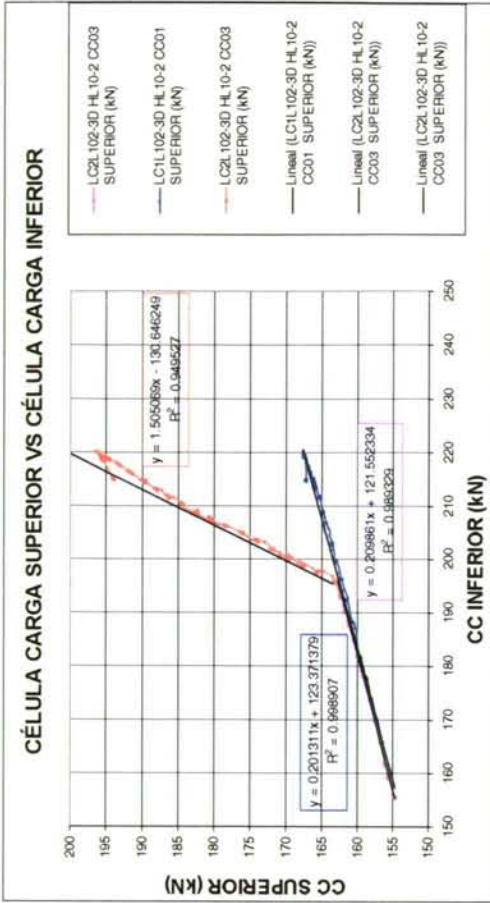
En la Gráfica 6.3.2.5-6 se presenta el comportamiento durante las 24 horas siguientes al ensayo. Se observa que se mantienen los valores de carga en ambos pórticos. Sin embargo, observando la Gráfica 6.3.2.5-9 se aprecia el “pull-out” diferido del pórtico 1, a los dos días del ensayo.

En la Gráfica 6.3.2.5-7 se presenta el comportamiento de la F.U.A respecto al deslizamiento superior. Se observa cómo disminuye la F.U.A. debido al “pull-out” diferido, en el pórtico 1. En el pórtico 2 se aprecia un descenso gradual de la F.U.A. tras el deslizamiento generalizado. La rama final descendente implica pérdida de F.U.A. sin deslizamiento, lo que puede ser debido a la relajación del pretensado y a un posible asiento diferido de las cuñas de anclaje.

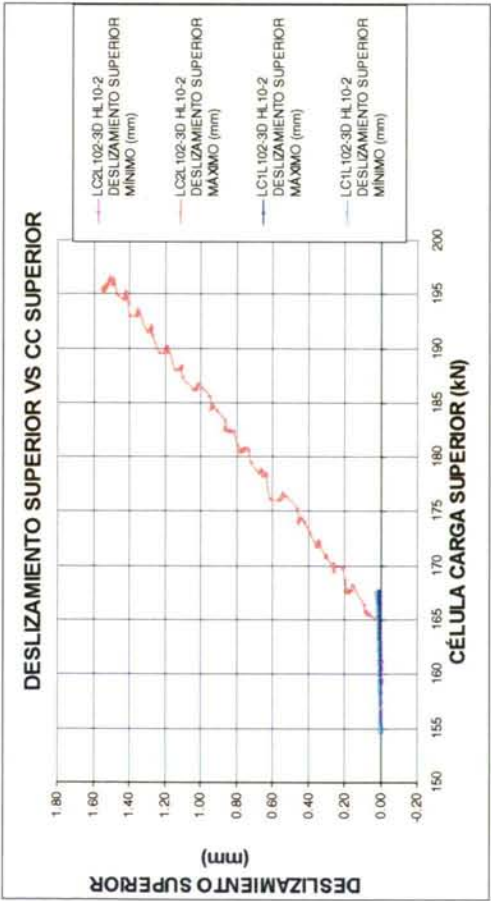
En la Tabla 6.3.2.5-2 se resumen los principales resultados. Este material presenta unas resistencias elevadas a la edad de ensayo, pero un comportamiento frágil una vez que se produce el deslizamiento, como se puede apreciar en la Gráfica 6.3.2.5-7. Además, la dispersión de resultados (patente en este apartado y en el 6.2.2.5, correspondiente a los pórticos LT) es superior a la del resto de los materiales estudiados.



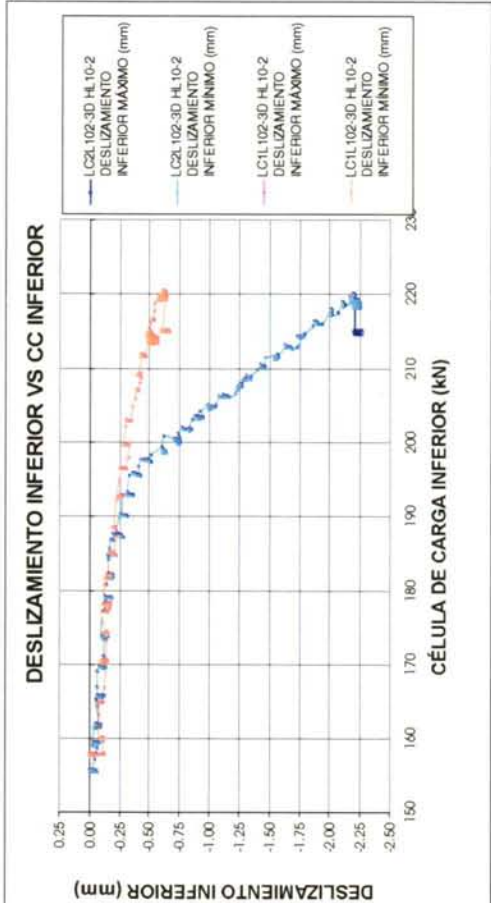
Gráfica 6.3.2.5-1



Gráfica 6.3.2.5-2

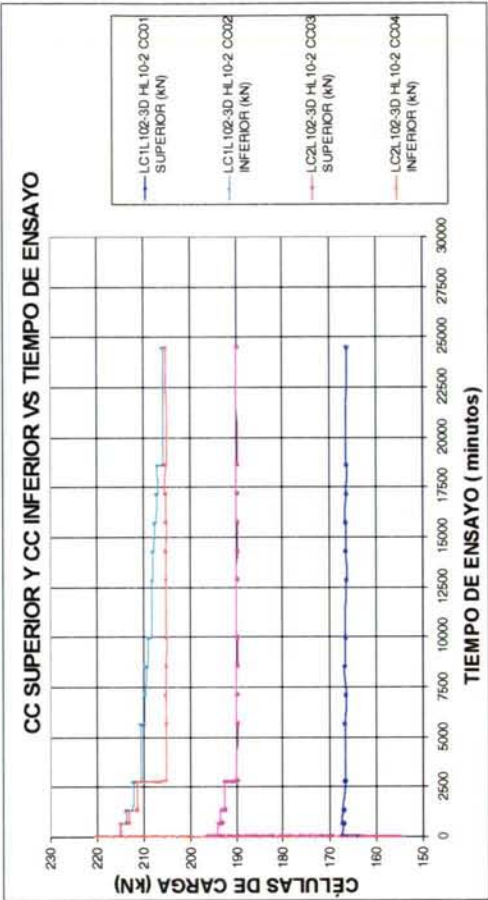


Gráfica 6.3.2.5-3

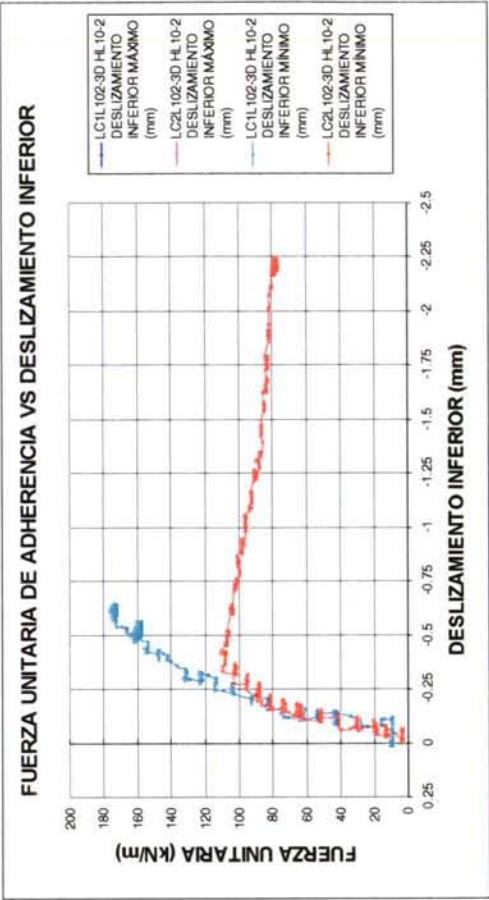


Gráfica 6.3.2.5-4

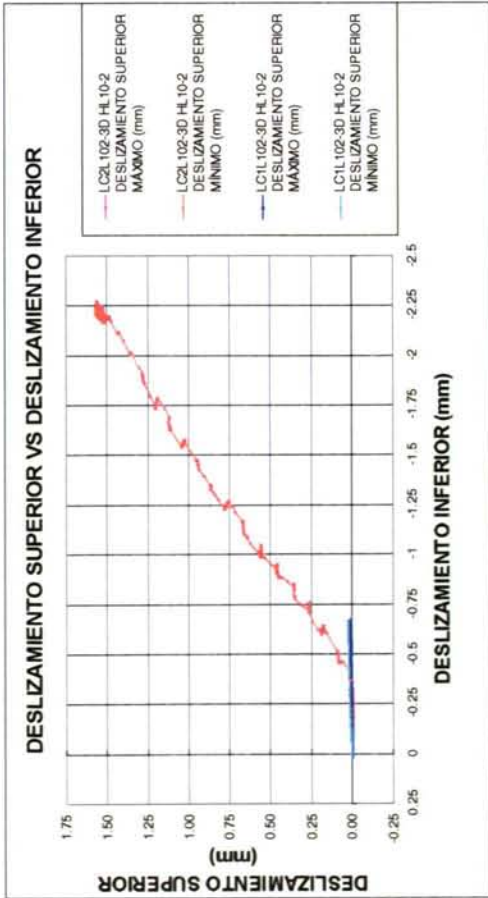




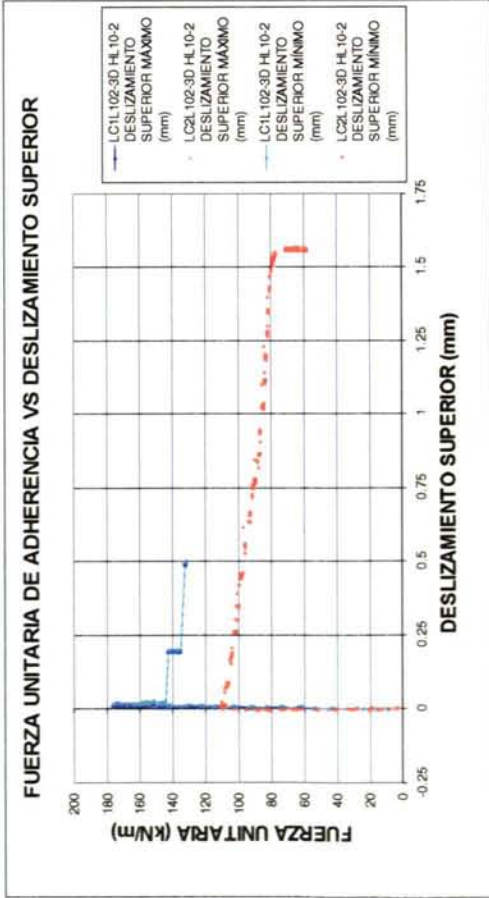
Gráfica 6.3.2.5-6



Gráfica 6.3.2.5-8



Gráfica 6.3.2.5-5

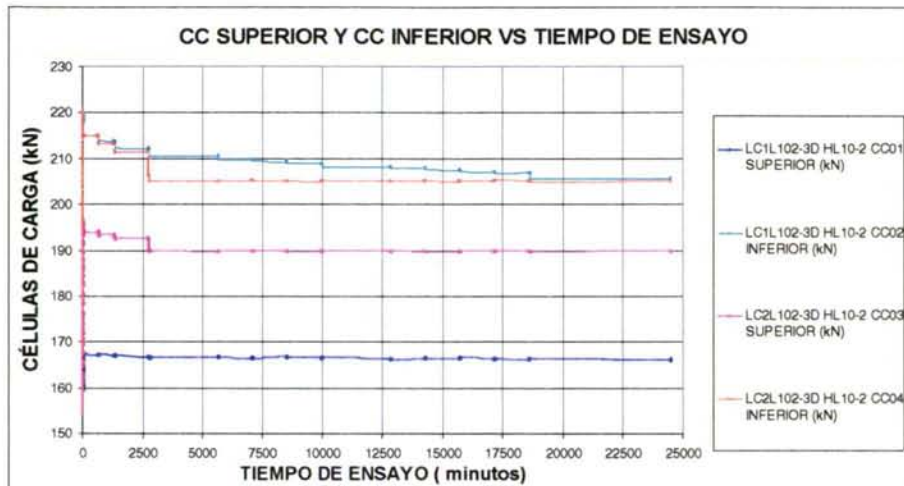


Gráfica 6.3.2.5-7

Tabla 6.3.2.5-1

Pórtico	Notación	LC1L102-3D	LC2L102-3D
Material		HL10-2	HL10-2
Fecha del hormigonado		21/03/2000	21/03/2000
Hora del fin de hormigonado		11:25	17:27
Fecha de ensayo		24/03/2000	24/03/2000
Hora del inicio del ensayo		12:08:57	18:00:09
Edad de ensayo (días)		3.03	3.02
Duración ensayo (minutos)		60.97	34.98
Duración ensayo total (días)		17.03	16.81
Límite elástico garantizado cordón (kN)		229.00	229.00
Carga inferior inicio ensayo $P(t_0)$ (kN)		157.67	155.65
Carga inferior máxima alcanzada durante el ensayo (kN)		220.61	220.20
Fuerza unitaria de adherencia máxima (kN/m)		176.44	110.72
	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC, LC, 3, \max}$		
Deslizamiento superior máximo para fuerza unitaria de adherencia máxima alcanzada durante el ensayo (kN)	$\delta_{HC, LC, 3, \max}^{MAX}$	0.01	0.01
Deslizamiento superior mínimo para fuerza unitaria de adherencia máxima alcanzada durante el ensayo (kN)	$\delta_{HC, LC, 3, \max}^{MIN}$	0.02	0.01
Fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento superior (kN/m)	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC, LT, 3, \max, AD}$	158.36	109.68
Deslizamiento superior máximo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento superior (kN/m)	$\delta_{HC, LC, 3, \max, AD}^{MAX}$	0.01	0.02
Deslizamiento superior mínimo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento superior (kN/m)	$\delta_{HC, LC, 3, \max, AD}^{MIN}$	0.02	0.02
Fuerza unitaria de adherencia mínima durante ensayo tras haberse producido deslizamiento generalizado (kN/m)		157.26	79.45
Fuerza unitaria de adherencia mínima diferida tras haberse producido deslizamiento generalizado (kN/m)		131.40	49.99
Tensión de compresión longitudinal máxima en la probeta (MPa) a la edad de ensayo	$\sigma_{c, \max}$	3.00	1.88
Resistencia a compresión probeta normalizada a la edad de ensayo (MPa)	$f_{cm, 3}$	59.13	59.45
Resistencia a tracción directa a la edad de ensayo (MPa)	$f_{ctm, 3}$	3.29	3.64





Gráfica 6.3.2.5-9

### 6.3.3. RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En la Tabla 6.3.3-1 se resumen los valores máximos y mínimos de la fuerza unitaria de adherencia, correspondientes a cada ensayo.

En la Tabla 6.3.3-2 se presenta el resumen comparativo de las F.U.A. obtenidas en cada ensayo, comparando para cada ensayo los diferentes resultados con el valor de la F.U.A. antes del deslizamiento generalizado.

En la Tabla 6.3.3-3 se resumen los valores obtenidos para cada material, promediando los resultados de ambos pórticos.

Finalmente, en la Tabla 6.3.3-4 se realiza una comparación de cada valor con el correspondiente al hormigón convencional a la edad de transferencia.

Donde:

$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT, LC, e, máx, AD}$	fuerza unitaria de adherencia máxima, previa al deslizamiento generalizado
$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT, LC, e, mín, DD}$	valor mínimo de la F.U.A. tras el deslizamiento generalizado
$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT, LC, e, máx}$	F.U.A. máxima durante el ensayo

Analizando los resultados obtenidos, se concluye que:

- Los ensayos realizados a la edad de tres días presentan resultados de F.U.A. superiores, debido a que los ensayos se mantuvieron durante varios días, por lo que se tiene en cuenta los efectos diferidos. Durante los días posteriores al ensayo descendió la fuerza unitaria adherente del hormigón ligero HL10-2, y se mantuvo estable la F.U.A. en el hormigón convencional.

- Por esto, paradójicamente aparece una F.U.A. superior para el HC a los tres días, respecto a la obtenida en el ensayo a los dos días, hecho que puede estar influenciado por el cambio de partida de los constituyentes del hormigón (cemento y áridos), cambio necesario por el elevado período de tiempo transcurrido entre ambos ensayos.
- Los valores de F.U.A. de los hormigones HL10-1 y HL3-1 tienen el mismo orden de magnitud que los correspondientes al HC, para una edad de transferencia de dos días. Los valores obtenidos presentan una buena correlación con las resistencias a tracción.
- Los valores de la F.U.A. obtenidos para el hormigón convencional, para una edad de ensayo de tres días son apreciablemente inferiores a los obtenidos para el mismo material, a los dos días. Esto puede ser debido al cambio de partida de los componentes del hormigón, necesario dado lo prolongado del período de ensayos.
- Se aprecia que el hormigón HL10-2 presenta unos valores de la F.U.A. superiores al HC ensayado a la misma edad, entre un 10 y un 20% superiores. Sin embargo, esta proporción no se cumple con la resistencia a compresión y tracción de las amasadas correspondientes.
- Durante el ensayo la capacidad adherente instantánea del HL10-2 resultó superior a la del HC ensayado a la misma edad, de hecho en uno de los pórticos de HL10-2 no se produjo deslizamiento durante el ensayo. Sin embargo, en las siguientes 48 horas se produjo deslizamiento generalizado diferido de ambos pórticos de HL10-2, lo que condujo a una disminución considerable de la F.U.A. final.

En la Tabla 6.3.3-5 se resumen las tensiones de adherencia obtenidas a partir del perímetro nominal del cordón (considerando un perímetro circular del diámetro nominal del cordón).

Las tensiones máximas de adherencia obtenidas por Abrishami-Mitchell (ABRI93) para cordón de 16 mm de diámetro nominal, fueron de 3.1 y 3.6 MPa en los ensayos referenciados. Las tensiones máximas obtenidas para el hormigón convencional a la edad de ensayo de dos días son similares a estos valores, 3.4 MPa. Sin embargo, el promedio de la tensión de adherencia máxima del HC a los tres días fue de 2.6 MPa, un 20% inferior a los resultados de Abrishami y Mitchell. Hay que tener en cuenta que la fuerza inicial del cordón adoptada por Abrishami-Mitchell fue considerablemente inferior a la empleada en estos ensayos: tan sólo 90 y 61 kN en los dos ensayos referenciados, frente a los 160 kN de estos ensayos.



Tabla 6.3.3-1

Ensayo	$f_{cm,i}$	$f_{cm,j}$	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT, LC, e, máx, AD}$	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT, LC, e, mín, DD}$	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT, LC, e, mín, DD}$	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT, LC, e, mín, DD, DIF}$	“pull-out” durante ensayo	“pull-out” diferido
	MPa	MPa	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	sí/no	sí/no
LC1C-2D	52	3.3	161.17	139.92	138.94	138.94	no	—
LC2C-2D	49	3.3	164.32	142.67	133.90	112.11	no	—
LC1L101-2D	49	2.8	157.27	157.27	130.72	113.70	no	—
LC2L101-2D	48	2.5	139.47	133.10	123.86	103.59	no	—
LC131-2D	49	2.2	177.83	176.06	146.31	123.26	no	no
LC231-2D	48	2.0	169.67	165.06	144.12	122.07	no	no
LC1C-3D	54	3.2	131.07	118.30	98.79	78.61	no	no
LC2C-3D	56	3.3	122.36	119.96	92.6	74.53	no	no
LC1L102-3D	59	3.3	176.44	176.44	157.26	131.40	no	sí
LC2L102-3D	59	3.6	110.72	109.68	79.45	49.99	no	sí

Tabla 6.3.3-2

Material	Edad de ensayo	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT, LC, máx, AD}$	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT, LC, mín, DD}$	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT, LC, mín, DD, DIF}$
LC1C-2D	2	1.15	0.99	0.99
LC2C-2D	2	1.15	0.94	0.79
LC1L101-2D	2	1.00	0.83	0.72
LC2L101-2D	2	1.05	0.93	0.78
LC131-2D	2	1.01	0.83	0.70
LC231-2D	2	1.03	0.87	0.74
LC1C-3D	3	1.11	0.84	0.66
LC2C-3D	3	1.02	0.77	0.62
LC1L102-3D	3	1.00	0.89	0.74
LC2L102-3D	3	1.01	0.72	0.46

Tabla 6.3.3-3

Material	Edad ensayo	$f_{cm,j}$	$f_{ctm,j}$	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT, LC, e, max}$	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT, LC, e, max, AD}$	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT, LC, e, min, DD}$	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT, LC, e, min, DD, DHF}$
	días	MPa	MPa	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m
HC	2	50.5	3.3	162.75	141.30	136.42	125.53
HL10-1	2	48.1	2.6	148.37	145.19	127.29	108.65
HL3-1	2	48.5	2.1	173.75	170.56	145.22	122.67
HC	3	54.8	3.2	126.72	119.13	95.70	76.57
HL10-2	3	59.3	3.5	143.58	143.06	118.36	90.70

Tabla 6.3.3-4

Material	Días	$\frac{f_{cm, MAT, j}}{f_{tm, HC, 2}}$	$\frac{f_{ctm, MAT, j}}{f_{ctm, HC, 2}}$	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT, LC, e, max}$	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT, LC, e, max, AD}$	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT, LC, e, min, DD}$	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{HC, LC, 2, min, DD, DHF}$
				kN/m	kN/m	kN/m	kN/m
HC	2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
HL10-1	2	0.96	0.95	0.91	1.03	0.93	0.87
HL3-1	2	1.03	0.95	1.07	1.21	1.06	0.98
HC	3	1.16	1.05	0.78	0.84	0.70	0.61
HL10-2	3	1.22	1.07	0.88	1.01	0.87	0.72

Tabla 6.3.3-5

Tensiones de adherencia	Ensayo LC	$\tau_{b, LC, max}$	$\tau_{b, MAT, LC, e, max, AD}$	$\tau_{b, MAT, LC, e, min}$	$\tau_{b, MAT, LC, e, min, DHF}$
		MPa	MPa	MPa	MPa
LC1C-2D	2	3.4	2.9	2.9	2.9
LC2C-2D	2	3.4	3.0	2.8	2.3
LC1L101-2D	2	3.3	3.3	2.7	2.4
LC2L101-2D	2	2.9	2.8	2.6	2.2
LC131-2D	2	3.7	3.7	3.1	2.6
LC231-2D	2	3.6	3.5	3.0	2.6
LC1C-3D	3	2.7	2.5	2.1	1.6
LC2C-3D	3	2.6	2.5	1.9	1.6
LC1L102-3D	3	3.7	3.7	3.3	2.8
LC2L102-3D	3	2.3	2.3	1.7	1.0



## 6.4. ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

En la Tabla 6.4-1 se presentan los resultados de los valores medios de las F.U.A. obtenidos en los ensayos LT y LC.

En la Tabla 6.4-2 se presentan los valores de recorrido relativo de los ensayos realizados (EHE98, Art.84), para los valores de la F.U.A. obtenidos:

$$rec(x_1, x_2) = \frac{abs(x_1 - x_2)}{promedio(x_1, x_2)} \cdot 100$$

donde:

$rec(x_1, x_2)$	recorrido relativo de los valores $x_1, x_2$ , en %
$x_1, x_2$	resultados experimentales
$abs(x_1 - x_2)$	valor absoluto de la diferencia entre los resultados $x_1, x_2$
$promedio(x_1, x_2)$	media aritmética de $x_1, x_2$

En general, se observa un mayor recorrido relativo en los ensayos LT que en los ensayos LC. El ensayo LC está más dominado por el efecto del rozamiento, realmente la componente mecánica es reducida. Sin embargo, el ensayo LT está condicionado por el efecto Hoyer, que implica una mayor interrelación entre el hormigón y el acero.

En el caso del HL10-2, los valores de recorrido relativo son extremadamente elevados en ambos tipos de ensayos: pórticos LT y pórticos LC, de hasta el 73% y el 90% respectivamente.

En la Tabla 6.4-3 se comparan los valores de la F.U.A. de los ensayos LT con los valores correspondientes de los ensayos LC. De esta forma se pretende comparar la capacidad adherente reflejada por cada ensayo. Se aprecia que los valores están comprendidos entre 1.4 y 2.3 para ensayos realizados a dos días, y entre 2.7 y 3.3 para los ensayos realizados a tres días.

Por ello se deduce que la capacidad adherente de la zona de transmisión obtenida es superior a la capacidad adherente de la zona complementaria de los ensayos realizados, lo que concuerda con los resultados de otros investigadores (ABRI93, DENU91). Esta diferencia se debe al efecto Hoyer y a la adherencia mecánica derivada de la forma del cordón, que actúa como un anclaje a medida que disminuye la tensión.

Tabla 6.4-1

Material	Edad de ensayo	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,max}$ kN/m	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,max,AD}$ kN/m	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,min,DD}$ kN/m	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,min,DD,DIF}$ kN/m	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,min,DD}$ kN/m	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,max,AD}$ kN/m	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,min,DD}$ kN/m	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,min,DD,DIF}$ kN/m	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,min,DD}$ kN/m
HC	días									
	2	285.81	257.01	203.2		162.75	141.30			136.42
HL10-1	2	323.38	288.41	198.705		148.37	145.19			127.29
HL3-1	2	315.42	237.11	202.03		173.75	170.56			145.22
HC	3	354.25	337.725	307.56	266.6	126.72	119.13			95.70
HL10-2	3	454.12	433.005	315.335	207.38	143.58	143.06			118.36

Tabla 6.4-2: Recorrido relativo de los ensayos realizados

Material	Edad de ensayo	$rec(x_1, x_2)$ %	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,max,AD}$ %	$rec(x_1, x_2)$ %	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,min,DD}$ %	$rec(x_1, x_2)$ %	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,min,DD,DIF}$ %	$rec(x_1, x_2)$ %	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,min,DD}$ %	$rec(x_1, x_2)$ %	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,min,DD,DIF}$ %
HC	días										
	2	2.43	2.38	6.40		1.94	1.95			3.69	21.37
HL10-1	2	23.21	19.43	29.49		12.00	16.65			5.39	9.31
HL3-1	2	11.56	1.68	5.06		4.70	6.45			1.51	0.97
HC	3	4.80	2.99	3.73	11.79	6.87	1.39			6.47	5.33
HL10-2	3	16.82	23.29	73.31	7.36	45.77	46.67			65.74	89.76

Tabla 6.4-3: Comparación entre las F.U.A. de los ensayos LT y LC

Material	Edad de ensayo (días)	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,max}$ %	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,max,AD}$ %	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,min,DD}$ %	$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,e,min,DD,DIF}$ %
HC	2	1.76	1.82	1.49	
HL10-1	2	2.18	1.99	1.56	
HL3-1	2	1.82	1.39	1.39	
HC	3	2.80	2.83	3.21	3.48
HL10-2	3	3.16	3.03	2.66	2.29



## 6.5. CONCLUSIONES PARCIALES DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

- Ni en la formulación de la EHE, ni en la del CM-90 aparece de forma explícita la influencia de los efectos diferidos sobre la capacidad adherente de la zona de transmisión y de anclaje en general. Estos efectos se han manifestado en los hormigones ligeros.
- En ninguno de los ensayos LT y LC de hormigón convencional se detectó ningún “pull-out”, durante el ensayo o diferido. Una vez producido el deslizamiento generalizado, el ensayo prosiguió de una manera continua.
- En la mayor parte de los ensayos LT realizados con hormigón ligero, 4 de 6 realizados, se han producido “pull-out” tras el deslizamiento generalizado. Se comprueba que el hecho de que se produzcan deslizamientos súbitos de pretensado en la zona exterior de la longitud de transmisión puede contribuir a restablecer una buena adherencia en las zonas afectadas, con tensiones de adherencia similares a las de la zona próxima a la de adherencia perfecta.
- Durante el proceso de ensayo “instantáneo” LC no se apreció ningún “pull-out”, para ninguno de los materiales.
- En todos los ensayos LC de hormigón ligero se detectaron fenómenos de “pull-out” diferido (véase la Tabla 6.3.3-1).
- En los ensayos LT en los que el deslizamiento se produce de forma gradual, tras el deslizamiento generalizado se mantiene sensiblemente constante o aumenta ligeramente la F.U.A. para valores crecientes del deslizamiento. Esto concuerda con la hipótesis de Den Uijl, que postula que las tensiones de adherencia son sensiblemente uniformes en la zona de transmisión. De esta forma se puede justificar que puedan aparecer varios máximos en el valor de la tensión de adherencia a lo largo de la zona de transmisión, tal y como postulaban otros investigadores (véase Capítulo 2, FUJI72). La hipótesis de crecimiento lineal de la fuerza de pretensado en la zona de transmisión es compatible con estos resultados experimentales.
- La existencia de “pull-out” tras el deslizamiento generalizado en los ensayos LT conduce a la existencia de varios máximos locales de la F.U.A. adherente, caracterizados por la ausencia de deslizamiento antes del máximo. En la transferencia súbita son de prever fenómenos de “pull-out” a lo largo de la zona de transmisión, separados por zonas de adherencia creciente, hasta alcanzar valores elevados de tensión de adherencia. Esto ocasionaría unas tensiones circunferenciales elevadas, con el consiguiente riesgo de fisuración. Este fenómeno puede explicar la gran dispersión de las medidas de la penetración del pretensado en vigas (CHON91).

## 6.6. VALORACIÓN CRÍTICA DE LOS ENSAYOS

Los valores de la F.U.A. se han obtenido para condiciones de trabajo diferentes de las reales:

- La posición del cordón durante el hormigonado es favorable respecto a la adherencia, lo que raramente sucede en la realidad. El recubrimiento del cordón de pretensado es considerablemente superior al que existe en la realidad. En la práctica es habitual un recubrimiento neto de 42 mm, que es considerablemente inferior al empleado en estos ensayos, de 67 mm. Por ello el confinamiento proporcionado por el hormigón es muy elevado, de hecho en ningún ensayo se produjo fisuración por hendimiento.
- En todos los casos el fallo se produjo por deslizamiento generalizado (“pull-out”). Reduciendo el recubrimiento o actuando en las condiciones de apoyo se puede inducir fallo por hendimiento, para determinar diferencia de comportamiento adherente con/sin fisuración por hendimiento.
- En este ensayo se intenta determinar la capacidad adherente de un solo cordón de pretensado. En la realidad los cordones se encuentran muy próximos entre sí, con separaciones entre ejes de 50 mm. Los campos de tensiones que se generan son diferentes al campo generado por un cordón aislado y confinado y, en general, desconocidos (DENU91).
- La forma de realización de los ensayos simula transferencia gradual, o bien puesta en carga gradual, lo que es favorable respecto a la adherencia.
- El estado tensional del hormigón de la probeta depende de la diferencia de fuerza entre la parte superior e inferior de la misma, por equilibrio. Por ello la probeta está longitudinalmente comprimida. Las tensiones de compresión son moderadas debido a las dimensiones de la probeta, entre 5 y 8 MPa para el ensayo LT, valores inferiores al 15% de la resistencia a compresión.
- De todas formas, este estado tensional difiere notablemente de las condiciones del hormigón en la zona complementaria a tracción, donde el hormigón estará traccionado, e incluso fisurado, lo que merma el efecto de confinamiento. Las tensiones de compresión máximas han variado entre 2 y 5 MPa, lo que supone en realidad una compresión muy reducida, menor del 10% de la resistencia a compresión.
- La simulación de la puesta en carga del cordón en el ensayo LC se hace de forma estática. Los cordones de pretensado de las vigas de estructuras en servicio están sometidas a acciones dinámicas, claramente desfavorables para la adherencia.
- La longitud adherente entre el cordón y el hormigón es de 300 mm. La distribución de las tensiones de adherencia en esta longitud difiere de la que se produce en la zona de anclaje de los elementos reales. Existe una controversia respecto a la longitud adherente deseable en los ensayos, para conseguir una distribución longitudinal de tensiones de adherencia a lo largo del cordón lo más uniforme posible (ABRI92).
- Como ya se apuntó antes, la edad de ensayo de los pórticos LC es considerablemente inferior a la edad de puesta en servicio de la estructura. Esta



condición nos pone del lado de la seguridad a la hora de determinar la cota inferior de la F.U.A. a largo de la longitud complementaria a tracción.

- Dependiendo de la longitud de cordón superior e inferior, se produce una coacción mayor o menor al giro experimentado al deslizar. Si el giro está coartado, aumenta la adherencia mecánica, al no poder deslizar por la “huella”, con lo que estaremos registrando una adherencia superior a la que existirá en la realidad. Si el giro del cordón fuese libre, estaríamos en el caso contrario, de adherencia desfavorable. En nuestro caso, a pesar de que se engrasan las superficies de apoyo de la cuña y las CC, creemos que el giro está parcialmente coartado por el rozamiento existente. Se podría plantear un sistema de anclaje que permitiese el giro del cordón.

A pesar de las diferencias de comportamiento adherente en elementos reales y en los ensayos planteados, creemos que:

- Los ensayos descritos, tanto el ensayo LT como el ensayo LC son ensayos sencillos, seguros, fácilmente reproducibles, rápidos y sistemáticos. La organización temporal de dos pórticos a la semana permite disponer de dos resultados para la misma muestra, lo que permite detectar dispersiones.
- La dispersión de resultados de los dos pórticos de un mismo material es menor del 26% para los ensayos LT, excepto en el caso del material HL10-2 (Tabla 6.4-2). La dispersión de los valores diferidos es inferior, de 12% y 8% para el HC y el HL10-2 respectivamente.
- La dispersión de resultados de ambos pórticos LC de cada material es inferior a la que presentan los ensayos LT, del 13% como máximo, excepto para el HL10-2. La dispersión de los valores diferidos es del 21% como máximo, excepto para el HL10-2.
- El HL10-2 ha demostrado tener una buena capacidad adherente, pero un comportamiento frágil cuando se produce el deslizamiento generalizado. Además, tanto los ensayos LT como LC presentan una dispersión acusada (de hasta el 75% y el 90% respectivamente).
- La dispersión de los resultados de los ensayos de adherencia en pórtico no es superior a la que presentan otras propiedades del hormigón, como la resistencia a tracción indirecta y el módulo de deformación. Incluso es menor que la detectada en valores como la longitud de transmisión y la penetración del pretensado en otras investigaciones, del orden del 100% (DENU91). De todas formas, para paliar este problema conviene aumentar el número de ensayos iguales a tres o cuatro, y realizar el ensayo en condiciones ambientales preestablecidas.
- Creemos que estos ensayos constituyen una metodología que permite simular las condiciones de trabajo del pretensado en los elementos prefabricados, con mayor aproximación que los ensayos “pull-out” convencionales (PCI96a, PCI96b), puesto que permiten la actuación de efectos intrínsecos al pretensado como el efecto Hoyer, el efecto de anclaje mecánico y el comportamiento diferido.
- Estimamos que estos ensayos se pueden normalizar, a fin de llenar el hueco normativo relativo a la adherencia del pretensado. Debido a las razones expuestas anteriormente, que motivan que las condiciones adherentes del cordón sean diferentes de las que aparecen en estructuras reales, sería necesario realizar una

campana de ensayos de pórtico para determinar los coeficientes correctores necesarios para estimar de manera precisa las longitudes de transmisión y complementaria a tracción. Las variables de esta campana experimental serían el tipo de hormigón, el recubrimiento, la longitud adherente, etc.

De todas formas, se plantea la cuestión del giro del cordón durante el ensayo. En estos ensayos el giro est  coartado, debido al rozamiento de las cuñas con la placa de anclaje de los pórticos. La coacción al giro parece, a priori, favorable respecto a las tensiones de adherencia máximas en el ensayo LT, y desfavorable en el ensayo LC. Esta cuestión ha sido planteada por Den Uijl (DENU91). Este aspecto debería considerarse como una variable operacional a la hora de plantear las futuras campanas de ensayos.



## *Capítulo 7*

# **DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD DE TRANSMISIÓN EN PRISMAS PRETENSADOS CON PRETENSADO CENTRADO**

### **7.1. INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se detallan las operaciones necesarias para la fabricación de prismas pretensados en la bancada construida a partir de los pórticos de adherencia. Se describe el proceso completo, desde el montaje de la bancada, hasta el almacenamiento de los prismas.

El método de fabricación de los prismas de pretensado se ha inspirado en el procedimiento de ensayo “Détermination de la Longueur Conventionnelle de Scellement des Armatures de Précontrainte par Adhérence” (LABO97), del *Laboratoire des Ponts et Chaussées*, y en la norma española UNE 7-436-82 (UNE82), que se basa también en el procedimiento anterior.

### **7.2. MONTAJE DE LA BANCADA CON LOS PÓRTICOS DE ANCLAJE**

Para realizar el montaje de la bancada, se necesita desmontar los dos pórticos de adherencia, que constituirán los anclajes activo y pasivo de la bancada, y añadir un cuerpo central de prolongación.

Para realizar esta operación son necesarios tres operarios y una grúa de 20 kN de capacidad y 2 m de brazo. La operación se completa en una media de seis horas de trabajo.

En la Fotografías 7.2-1 a 7.2-6 se esquematiza el proceso de montaje de la bancada.



*Fotografía 7.2-1: Desmontaje de los pórticos de adherencia*



*Fotografía 7.2-2: Desmontaje de las placas de apoyo de la probeta*



*Fotografía 7.2-3: Cuerpo central de la bancada*



*Fotografía 7.2-4: Ensamblaje del cuerpo central y los anclajes*



*Fotografía 7.2-5: Colocación de la bancada en zona próxima de la amasadora*



*Fotografía 7.2-6: Bancada montada. Vista del anclaje pasivo, con sistema de recuperación de pérdida por penetración de cuñas*



### 7.3. EQUIPOS E INSTRUMENTACIÓN

Para la realización de los ensayos de determinación de la longitud de transferencia de prismas pretensados de armadura pretesa realizados con los hormigones de altas resistencias iniciales objeto de estudio, se ha contado con los siguientes equipos de instrumentación:

- A. 4 células de carga huecas, de la marca Sensotec, con 330 kN de capacidad, alimentadas con un voltaje de 10 voltios. Estas células de carga se disponían entre las cuñas de anclaje y la placa de anclaje, en ambos extremos del cable, con objeto de conocer en cada momento anterior y durante la transferencia la tracción a que estaba sometido el cordón de pretensado. El acoplamiento de la célula con la cuña de anclaje se hace mediante una pieza mecanizada para encajar perfectamente entre ambas, y de esta forma asegurar la transmisión de la carga centrada a la célula.
- B. Dos transductores potenciométricos de desplazamiento, de 11.0 mm de recorrido, sujetos al cable mediante pinzas elásticas y apoyados en las caras dorsal y frontal del prisma respectivamente, con objeto de determinar en cada momento de la transferencia de pretensado la penetración del cable dentro del hormigón. El voltaje medio de alimentación de estos potenciómetros resistivos era de 10 voltios.
- C. Un transductor potenciométrico de desplazamiento, de 51.5 mm de recorrido, que se sujetaba al cable mediante una pinza elástica, y se apoyaba en una placa solidaria al cable y perpendicular al mismo, con objeto de determinar en cada momento del tesado el alargamiento medio del cable. El voltaje medio de alimentación de estos potenciómetros resistivos era de 10 voltios.
- D. Galgas extensométricas de la marca TML, PL-60 y PL-90, de 60 o 90 mm de longitud. Estas galgas se utilizaron para medir las deformaciones superficiales del hormigón. El adhesivo utilizado para estas galgas era cianocrilato o una segunda capa de poliéster, en ambos casos siempre sobre base de poliéster. La fuente de alimentación de las galgas suministraba un voltaje medio de 5 voltios. La forma de conexión de las galgas extensométricas fue en cuarto de puente de Wheatstone, mediante tres hilos, con el fin de compensar las pérdidas producidas por los cables de conexión. La longitud máxima de los cables no superó los 6 metros.
- E. Galgas extensométricas de la marca MM, modelo EA-125BT-120, que se adherían a un alambre del cordón de pretensado con cianocrilato, con objeto de determinar la deformación del alambre durante el tesado, posteriormente durante la transferencia de pretensado y después. Puesto que estas galgas debían permanecer en funcionamiento durante y tras el hormigonado del prisma, se protegían con un recubrimiento de aislante M-coat B y una capa de butilo, ambos materiales suministrados por la empresa GMI. La fuente de alimentación de las galgas suministraba un voltaje medio de 5 voltios. La forma de conexión de las galgas extensométricas fue en cuarto de puente de Wheatstone, con montaje a tres hilos, a fin de compensar los desequilibrios producidos por los cables de conexión. La longitud máxima de los cables no superó los 6 metros.
- F. En ambas caras laterales de cada prisma, a la altura del centro del cordón de pretensado se pegaron discos, cada 50 mm aproximadamente sobre una base de

poliéster (PS) el día posterior al hormigonado del prisma, con la finalidad de evaluar las deformaciones del hormigón tras la transferencia y las deformaciones diferidas mediante un aparato Demec.

Durante todo el proceso de adquisición de datos se registraron y grabaron los valores reales de las diferencias de potencial suministradas por las fuentes de alimentación de las galgas y del resto de los equipos de instrumentación electrónica, necesarios para una correcta interpretación de los resultados.

## 7.4. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

Antes de proceder al tesado del cable, se limpia con acetona y se disponen las galgas de cable, en total 5, centradas en la longitud de la bancada (véase Anexo 3).

Se tesa el cordón de pretensado en la bancada, a la tensión máxima permitida por la normativa, en este caso limita  $0.85 f_{pmáx,k}$  (EHE98). Tras las pérdidas por penetración de cuñas, se recupera carga mediante el sistema de tuercas, hasta alcanzar la fuerza  $P_0$  correspondiente al máximo de tensión admitida por la normativa española de forma permanente, en nuestro caso limita  $0.75 f_{pmáx,k}$ . El control del tesado se efectúa con las células de carga de ambos anclajes, y las galgas adheridas al cordón de pretensado.

Tras el tesado se comprueba que las galgas de cable han funcionado correctamente. En ese caso, se protegen las galgas de cable. En caso contrario, se reemplazan las galgas defectuosas, se inicializa la medida y se protegen.

La regulación de la posición del molde se realiza con la ayuda de dos gatos manuales de 2000 kp, situados en ambos extremos. Una vez comprobado el centrado del cordón respecto a la sección del prisma con una plantilla al efecto, se procede al hormigonado del prisma.

Para la confección del prisma (42 litros) y de las probetas de acompañamiento (39 litros) en una sola amasada, es insuficiente la capacidad de la amasadora del Laboratorio de la ETSICCP, por lo que se decidió realizar dos amasadas iguales de 45 litros, sucesivas, y realizar un proceso de mezclado en la amasadora de ambas amasadas.

El proceso de hormigonado se realiza llenando en primer lugar el prisma, compactando con vibrador de aguja de 25 mm de diámetro, a razón de 5 segundos por litro. Seguidamente se confeccionan las probetas de acompañamiento, que se compactan de la misma manera. Las probetas de acompañamiento se almacenan en las mismas condiciones que el prisma (véanse Fotografías 7.4-1 y 7.4-2).

Al igual que en el ensayo de los pórticos, se realiza un curado húmedo, durante las 20 horas posteriores al hormigonado. El desencofrado se realiza a las 24 horas. Al cabo de varias horas del final del proceso de hormigonado se toman medidas de referencia de las probetas de retracción.



Tras el desencofrado se procedía a la colocación de la instrumentación en el hormigón sobre una base de poliéster: discos de extensometría en ambas caras laterales, a 50 mm de distancia, y galgas de hormigón PL-60.

La edad de transferencia se fijó en dos días<sup>7.1</sup>, coincidiendo con la edad de realización de los correspondientes ensayos de pórtico de transmisión de cada material, para poder correlacionar los resultados obtenidos.

Antes de la transferencia se toma referencia de los discos de extensometría, y medidas de todos los sensores electrónicos. También se toman medidas de retracción de las probetas y del prisma. Además, se adoptan una serie de medidas de seguridad (véase Anexo 3). El proceso de transferencia se realiza con soplete de oxígeno-propano, de forma gradual, calentando una zona de cordón de 40 cm de longitud. En la mayor parte de los casos, la transferencia se llevó a cabo en 10 minutos.

Simultáneamente a la transferencia se ensayan las probetas de acompañamiento en el Laboratorio de la ETSICCP de La Coruña, y en el Laboratorio de Cementos Cosmos en Oural, y se toman medidas de retracción de las probetas.

Durante la transferencia de pretensado se mantienen conectados los sensores electrónicos. Inmediatamente tras la transferencia, y posteriormente de forma periódica se toman medidas de los discos de extensometría, en un proceso que requiere dos horas (véanse Fotografías 7.4-3 a 7.4-5).

Finalmente se traslada el prisma, apoyándolo en caballetes cada 30 cm, para que no se origine flexión apreciable. El almacenamiento de los prismas se realiza sobre apoyos deslizantes, que permiten la libre deformación axial del elemento (véase la Fotografía 7.4-6).

Durante este proceso se controlaban los siguientes parámetros:

- Fuerza de pretensado en los anclajes activo y pasivo de la bancada, mediante células de carga huecas.
- Deslizamiento relativo del cordón de pretensado respecto a las caras norte y sur del prisma, mediante transductores de desplazamiento.
- Deformación del cordón de pretensado, mediante galgas extensométricas de cable adheridas a un alambre exterior del cordón, en varias secciones del prisma.
- Deformación longitudinal y transversal del hormigón de ambas caras laterales del prisma, mediante varias galgas dispuestas simétricamente respecto al eje de la probeta.

<sup>7.1</sup> Se realizaron prismas de HL10-1, HL3-1 y HC. La edad de transferencia adoptada para estos materiales fue de 48 horas.



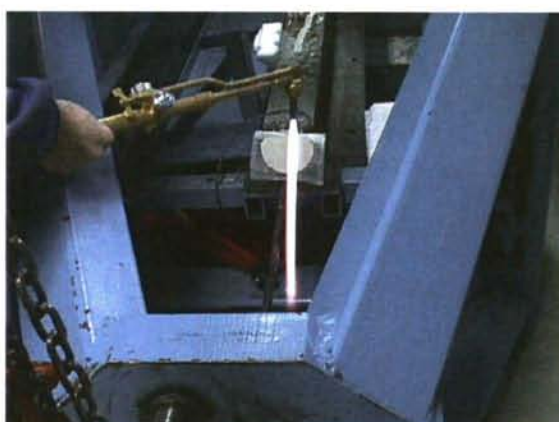
*Fotografía 7.4-1: Molde preparado para el hormigonado del prisma y probetas*



*Fotografía 7.4-2: Prisma tras la finalización del hormigonado*



*Fotografía 7.4-3: Protección de amianto del transductor del extremo próximo a la zona de corte*



*Fotografía 7.4-4: Proceso de transferencia por calentamiento gradual*



*Fotografía 7.4-5: Extremo próximo al corte tras la finalización de la transferencia*



*Fotografía 7.4-6: Almacenamiento de prismas sobre soportes deslizantes*



## **7.5. VALORACIÓN CRÍTICA DEL ENSAYO**

Este ensayo presenta las siguiente ventajas:

- El ensayo descrito es sistemático. La única incertidumbre se reduce a la transferencia de pretensado.
- El sistema bancada-pórticos ha demostrado una gran versatilidad.
- El plazo de ejecución del ensayo, de una semana, proporciona una gran facilidad de programación.
- El ensayo permite evaluar la susceptibilidad del material a presentar fisuración por hendimiento.
- El sistema de ensayo permite variar el tipo de pretensado, recubrimiento, el tipo de hormigón, la separación entre cordones, la presencia y cuantía de armadura de confinamiento,...
- La posición del cordón es desfavorable respecto a la adherencia, lo que concuerda con la peor situación del cordón en las vigas reales.

Los principales inconvenientes de este ensayo son:

- La laboriosidad del proceso de instrumentación, que requiere muchas horas.
- El coste de la instrumentación no recuperable, más elevado que en el ensayo de los pórticos.
- La dificultad de realizar la transferencia gradual con soplete. Se podría plantear en un futuro la transferencia mediante un sistema mecánico. Este método conduce a que sea difícil controlar la duración de la transferencia.
- La dificultad de transporte de los prismas sin que experimenten flexión apreciable.
- La ocupación espacial de los prismas, para poder realizar medidas periódicas.
- En este ensayo la información obtenida se reduce a la longitud de transmisión, y a la evolución de las deformaciones del hormigón y del pretensado.





## Capítulo 8

# ENSAYOS DE LOS PRISMAS PRETENSADOS

### 8.1. INTRODUCCIÓN

Los prismas pretensados fabricados constan de una sección transversal de  $10.5 \times 10.5$  cm<sup>2</sup>, y una longitud de 3.75 m. El pretensado consiste en un cordón de pretensado único centrado en la sección, de 15.2 mm de diámetro (UNE97). Estos elementos no contienen armadura pasiva alguna.

La disposición del cordón de pretensado, centrado en la sección transversal de la viga, de canto reducido, hace que la posición de nuestro cordón de pretensado sea tipo II o desfavorable respecto a adherencia.

En la Tabla 8.1-1 se detallan los prismas cuyo análisis se aborda a continuación.

*Tabla 8.1-1: Fabricación de los prismas pretensados*

Prisma	Fecha tesado	Fecha hormigonado	Fecha transferencia
P1L10-1	20-1-99	20-01-99	22-1-99
P1L3-1	25-1-99	26-01-99	28-1-99
P3C	1-2-99	2-02-99	4-2-99
P2L3-1	9-2-99	10-02-99	12-2-99
P2L10-1	15-2-99	17-02-99	19-2-99
P4C	23-2-99	24-02-99	26-2-99
P3L3-1	2-3-99	3-03-99	5-3-99
P3L10-1	9-3-99	10-03-99	12-3-99

Como se ha explicado anteriormente en el Capítulo 6, la instrumentación electrónica consta de:

- Células de carga huecas (CC), colocadas en los anclajes pasivo y activo de la bancada, que permiten la determinación de la fuerza de pretensado hasta la transferencia.
- Bandas extensométricas adheridas al pretensado, previamente a la fabricación, que denominaremos galgas de cable (GC).
- Bandas extensométricas adheridas a los paramentos de los prismas tras su desencofrado, colocadas paralelamente al eje longitudinal, a la altura del pretensado, en ambas caras laterales, denominadas galgas de hormigón (GH).

También se colocaron discos de extensometría a lo largo de todo el prisma, en ambas caras laterales, a la altura del pretensado, situados cada 50 mm aproximadamente, a fin

de determinar la ley de deformación longitudinal del hormigón a lo largo de todo el elemento.

A continuación se presenta un esquema de la instrumentación de los prismas (Figuras 8.1-1 y 8.1-2):

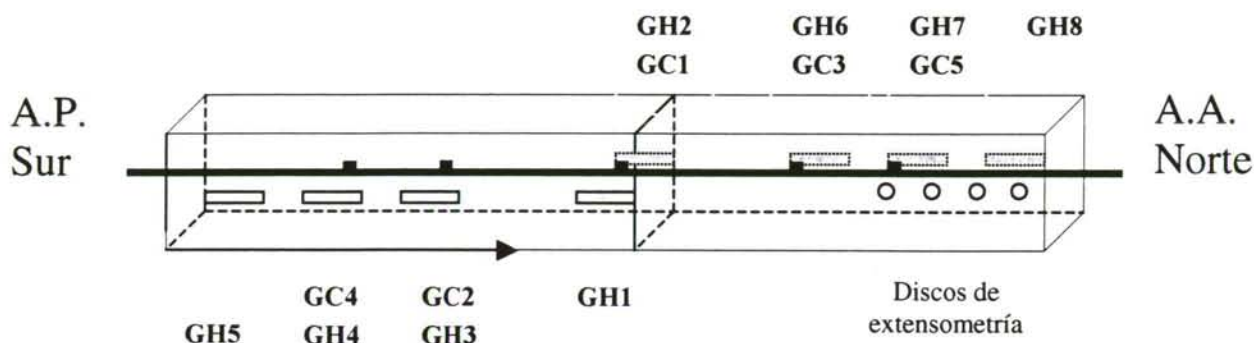


Figura 8.1-1: Instrumentación de todos los prismas, excepto el P3L10-1

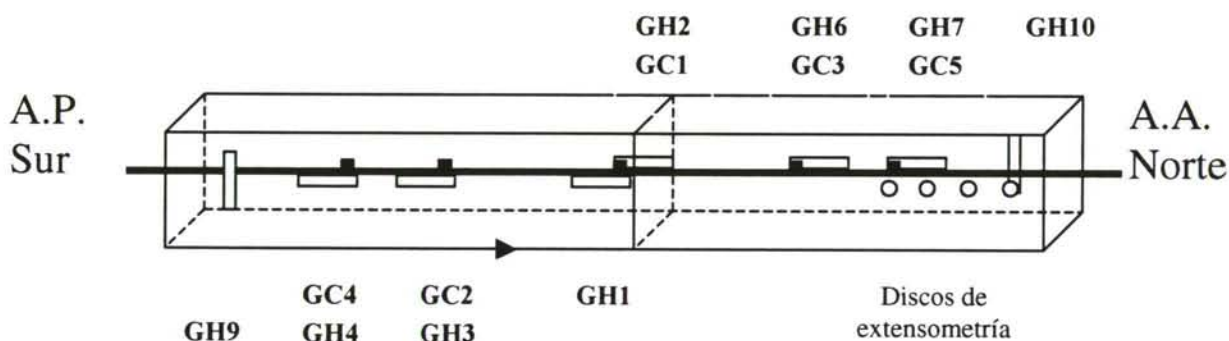


Figura 8.1-2: Instrumentación del prisma P3L10-1

Según el sistema de coordenadas adoptado, se diferencian las caras Norte (N), Sur (S), Este (E), Oeste (W), Superior (SUP) e Inferior (I) de los prismas.

El tesado y la transferencia se realizaron desde el extremo Norte, que constituye el anclaje activo (A.A.).

La fuerza de pretensado realmente transferida en la zona central de la viga, determinada para un elemento con pretensado excéntrico horizontal situado bajo el centro de gravedad de la sección<sup>8.1</sup>, viene dada por la siguiente expresión:

$$P_3 = \frac{P_2 + \frac{nM_{pp}e}{I_c} A_p}{1 + n\rho + \frac{ne^2 A_p}{I_c}}$$

$$\sigma_{cgp} = -P_3 \left[ \frac{1}{A_c} + \frac{e^2}{I_c} \right] - \frac{M_{pp}e}{I_c}$$

<sup>8.1</sup> Siempre y cuando se produzca contraflecha en la sección considerada tras la transferencia.



donde:

$P_3$	fuerza de pretensado total, inmediatamente después de la transferencia de pretensado, en la zona central del elemento
$P_2$	fuerza de pretensado total, inmediatamente antes de la transferencia de pretensado, en la zona central del elemento
$M_{pp}$	momento flector producido por el peso propio movilizado durante la transferencia, en la zona central del elemento
$A_c, I_c$	características de la sección neta de hormigón
$n = \frac{E_p}{E_{cm,j}}$	coeficiente de equivalencia de un determinado hormigón a la edad $j$
$j$	edad de transferencia de pretensado (días)
$E_{cm,j}$	módulo de deformación secante medio, a la edad de transferencia $j$
$\rho = \frac{A_p}{A_c}$	cuantía geométrica de pretensado
$e$	excentricidad media del pretensado respecto al c.d.g. de la sección neta
$\sigma_{cgp}$	tensión originada en el hormigón, a la altura del c.d.g. del pretensado, al transferir

En este capítulo se determinarán las pérdidas instantáneas de pretensado mediante la expresión anterior, particularizada para nuestro caso, por estar el pretensado centrado, el peso propio no genera flexión durante la transferencia.

El valor de la fuerza de pretensado total, antes de la transferencia de pretensado, y el módulo de deformación secante a la edad de transferencia, son valores que se determinan experimentalmente para cada prisma.

Como se observa, la fuerza de pretensado transferida será mayor cuanto mayor sea el módulo de deformación del material. El hormigón ligero presenta un módulo de deformación considerablemente inferior al hormigón convencional, por lo que las pérdidas de pretensado instantáneas serán superiores. Esto implica que la fuerza de pretensado transferida es inferior a la de los prismas de hormigón convencional, lo que cuestiona la comparación en términos absolutos del valor de la longitud de transmisión de ambos tipos de material.

En los apartados siguientes se presentan los resultados del análisis de los prismas fabricados con ambos tipos, relativos a la instrumentación electrónica y mecánica.

## 8.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

A continuación se presenta el análisis de las medidas proporcionadas por la instrumentación electrónica de cada prisma. Los prismas están ordenados por material (HL10-1, HL3-1 y HC, en este orden) y por la fecha de fabricación, que condiciona su numeración.

Los valores de penetración del pretensado se han corregido teniendo en cuenta el acortamiento del cordón de pretensado entre la pinza de sujeción y el extremo del prisma, experimentado durante la transferencia. Dada la incertidumbre de esta distancia debido al espesor de la pinza, de 20 mm, se ha acotado superior e inferiormente el valor de la penetración en cada extremo.

La corrección se realiza a partir de la Figura 8.2-1, se detalla en las Tablas 8.2-1 y 8.2-2:

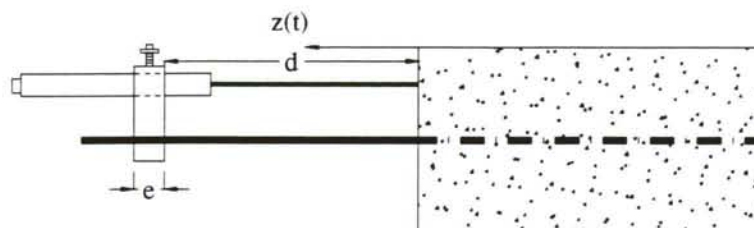


Figura 8.2-1

Tabla 8.2-1

	Antes de transferir	Después de transferir
<b>Fuerza de pretensado (positiva tracción)</b>	$P(t_0)$	$P(t)$
<b>Medida registrada por el transductor (positiva a compresión)</b>	$z(t_0)$	$z(t)$
<b>Penetración del pretensado corregida</b>	$\delta(t) = L(t) - L(t_0) - \frac{P(t)L(t) - P(t_0)L(t_0)}{A_p E_p}$	

Con la nomenclatura del Apartado 6.1. Como en el Capítulo 6, se acotan los valores de deslizamiento relativo, debido a la incertidumbre en la longitud instrumentada, mediante:

Tabla 8.2-2

VALOR	$L(t_0)$	$L(t)$	$\delta$	DESLIZAMIENTO
<b>Corr. máxima</b>	$L(t_0)^{M\acute{A}X}$	$L(t)^{M\acute{A}X}$	$\delta_1(t)$	$\delta^{M\acute{A}X}(t) = \text{máx} / \delta_1(t), \delta_2(t) /$
<b>Corr. mínima</b>	$L(t_0)^{M\acute{I}N}$	$L(t)^{M\acute{I}N}$	$\delta_2(t)$	$\delta^{M\acute{I}N}(t) = \text{mín} / \delta_1(t), \delta_2(t) /$

En todos los prismas fabricados la transferencia se realizó a las 48 horas del hormigonado, mediante un soplete de oxígeno-propano, de forma gradual, en un proceso de 10 a 15 minutos de duración media.

Antes de la transferencia se tomaron medidas de referencia de la extensometría mecánica, y de las galgas. Inmediatamente después de la transferencia se tomaron medidas de deformación, a fin de poder determinar las deformaciones instantáneas y las pérdidas instantáneas de pretensado.

Se tomaron medidas a la semana de la transferencia, un mes, dos meses, medio año y un año, para estudiar la evolución de la longitud de transmisión.



### 8.2.1. Prisma P1L10-1

En la Tabla 8.2.1-1 se resumen las pérdidas de pretensado tras la transferencia, y se comparan con las pérdidas instantáneas teóricas, determinadas a partir de la expresión del Apartado 8.1. En la Tabla 8.2.1-2 se resumen los resultados obtenidos a partir de las galgas extensométricas de hormigón empleadas. Comparando los valores de deformación obtenidos y los teóricos, se diferencia las galgas de la zona central y de la zona de transmisión (TR)<sup>8.2</sup>.

En la Tabla 8.2.1-3 se resumen los valores de penetración obtenidos inmediatamente tras la transferencia, tanto la cota superior como la inferior (aplicando la corrección del Apartado 8.2), en los anclajes activo (Norte, desde donde se transfiere el pretensado) y pasivo (Sur).

En la Gráfica 8.2.1-1 se observa la ley de deformaciones del hormigón longitudinales en el prisma durante la transferencia, y a las edades de medida posteriores. Se aprecia que al inicio de la transferencia la deformación es constante a lo largo del prisma, lo que puede estar motivado por la adherencia de contacto/mecánica en la zona instrumentada. Para esos niveles de carga la longitud de transmisión no alcanza a las galgas laterales, situadas a 30 cm de ambos extremos. Cuando la fuerza transferida alcanza el 40%, (véase también la Gráfica 8.2.1-10) se aprecia cómo se va incurvando la ley, presentando deformaciones menores para las galgas situadas en la zona de transferencia. Analizando la gráfica, una vez transferido todo el pretensado, se observa cómo la longitud de transmisión aparente no supera el metro de longitud en ambos extremos.

Tras el final de la transferencia, se aprecia como la deformación del hormigón aumenta con el tiempo, debido a la fluencia y la retracción. Se observa que la deformación de la zona central aumentó desde aproximadamente -800 ue tras la transferencia hasta -1500 ue al cabo de dos meses (Gráfica 8.2.1-1).

En la Gráfica 8.2.1-2 se aprecia el valor de la fuerza de pretensado estimada a través de las galgas de pretensado, respecto a la distancia al anclaje pasivo (extremo Sur) durante la transferencia y a ciertas edades tras la misma. Se observa el fallo de la galga más alejada del extremo Sur. Las diferencias de la fuerza de pretensado estimada, para las distintas galgas pueden ser debidas a que éstas se adhieren a un alambre del cordón de pretensado, y la deformación de cada alambre puede ser ligeramente diferente de la de los otros alambres. Los valores de la fuerza de pretensado y de las pérdidas estimadas son poco verosímiles al cabo de los dos meses, probablemente debido al fallo del adhesivo de las galgas, que tiene una vida media de varios meses (Gráfica 8.2.1-4).

En la Gráfica 8.2.1-5 se presentan los valores de las pérdidas de pretensado estimadas, referidas a la fuerza de pretensado antes de la transferencia. Como se ve están comprendidas entre un 10 y un 15% de la fuerza de pretensado inicial, y aumentan hasta el 35% al cabo de dos meses (véase también la Gráfica 8.2.1-3). Esto puede ser debido a la fisuración por hendidamiento generalizada.

En la Gráfica 8.2.1-6 se representa el porcentaje de la fuerza de pretensado transferida respecto a la penetración del pretensado en ambos extremos. Paradójicamente, en este

<sup>8.2</sup> Realmente, debido al efecto Saint-Venant, la longitud de transmisión es menor que la que se mide a partir de las deformaciones del hormigón en el paramento, como hemos visto en el Capítulo 2.

prisma la penetración es superior en el extremo Sur, lado opuesto al corte. Si representamos en escala logarítmica ambos ejes (Gráfica 8.2.1-7), se aprecia una gran linealidad de las leyes resultantes, con un valor del coeficiente  $R^2$  superior a 0.99. Esto significa realmente la fuerza de pretensado transferida es potencial respecto al deslizamiento:

$$\ln\left(\frac{P(t)}{P_2}\right) = a \ln(\delta(t)) + b \Rightarrow P(t) = P_2 (e^b \delta(t)^a)$$

donde:

- $P(t)$  fuerza de pretensado transferida en el instante  $t$
- $a, b$  constantes
- $P_2$  fuerza de pretensado inmediatamente antes de la transferencia
- $\delta(t)$  penetración del cordón a la edad  $t$

Esto ya había sido observado por otros investigadores (CEBT87). Si bien la linealidad es baja al inicio de la transferencia (en la que, por otra parte, la función logarítmica es divergente), la correlación mejora a medida que ésta progresa.

La transferencia tuvo lugar de forma gradual, según se puede apreciar en la Gráfica 8.2.1-8, con una duración aproximada de 10 minutos.

En las Gráficas 8.2.1-9 y 8.2.1-10 se aprecia la variación de la deformación del pretensado y del hormigón respecto al porcentaje de carga transferida, a partir de las bandas extensométricas dispuestas. Ambas leyes son marcadamente lineales en las galgas de la zona central. En las galgas de los extremos, se aprecia un comportamiento lineal hasta un determinado porcentaje de la fuerza de pretensado transferida, momento en que prácticamente se anula el gradiente de deformación, debido a la pérdida de adherencia en la zona de transmisión.

En la Gráfica 8.2.1-11 se comparan las deformaciones de galgas de cable y galgas de hormigón situadas a la misma distancia del extremo del prisma. Se aprecia la adherencia perfecta de las galgas de la zona central (galgas GH1, GH2 y GH6), donde el hormigón “acompaña” al pretensado en su deformación. Como se puede apreciar, la galga GH7 falló durante la transferencia.



Tabla 8.2.1-1

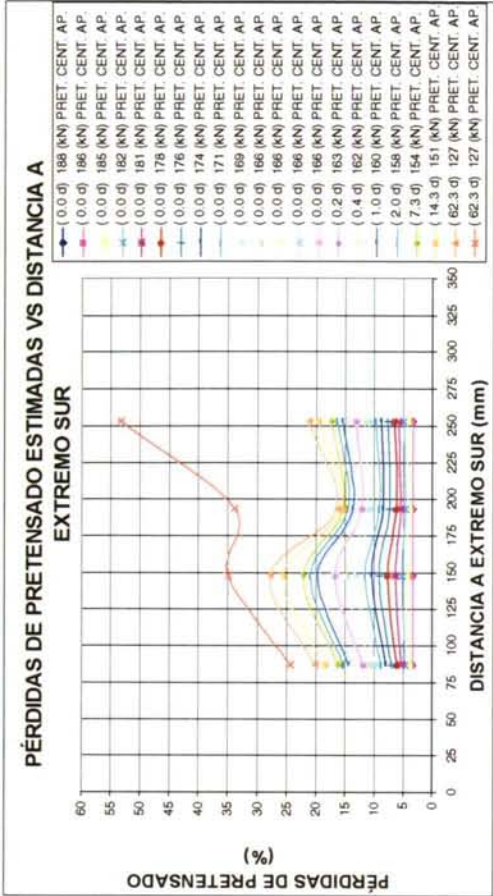
P1L10-1	Fecha tesado:	Fecha transferencia:	Célula de carga CC64	Célula de carga CC65	Galga cable 04	Galga cable 02	Galga cable 01	Galga cable 03
	20/01/1999	22/01/99	Sur	Norte	87	148	193	253
	Tiempo transcurrido desde tesado	Tiempo transcurrido desde transferencia	Anclaje pasivo	Anclaje activo	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur
	Fecha	Segundos	(kN)	(kN)	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente
Pretensado antes transferencia	22/01/99	0	186.1	189.1	187.6	187.6	187.6	187.6
Pretensado tras transferencia	2.03	2811	-2.3	0.1	170.7	161.3	170.3	168.4
% Pérdidas instantáneas reales	2.06				9.0	14.0	9.2	10.3
% Pérdidas instantáneas teóricas					11.6	11.6	11.6	11.6
% Pérdidas reales / % Pérdidas teóricas tras transferencia					0.8	1.2	0.8	0.9
Zona: TR/central					Central	TR	Central	Central

Tabla 8.2.1-2

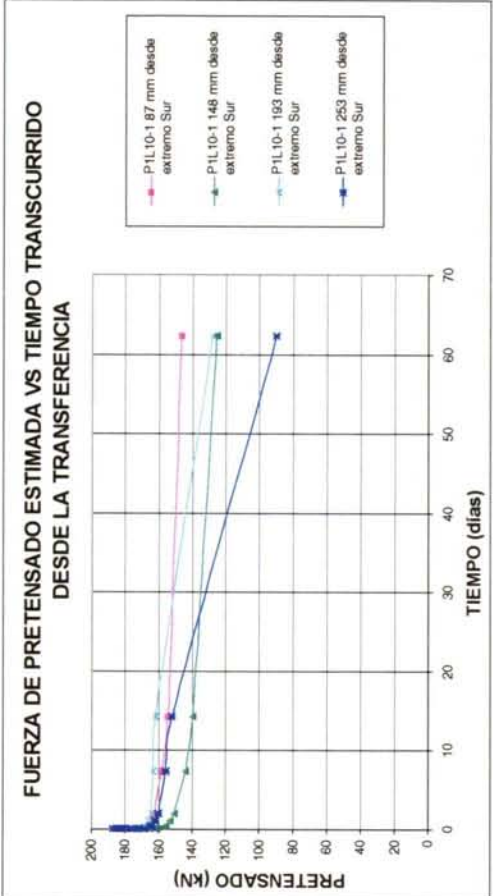
	P1L10-1						
Galga de hormigón	04	03	01	02	06	07	08
Cara	Este	Este	Este	Oeste	Oeste	Oeste	Oeste
Distancia desde el extremo sur (mm)	62.5	87.5	187.1	189	288.5	313.4	342.5
Def. real antes transferencia (ue)	0	0	0	0	0	0	0
Def. real tras transferencia (ue)	-598	-804	-785	-690	-792	-681	-268
Def. teórica tras transferencia (ue)	-776	-776	-776	-776	-776	-776	-776
Def. real /def. teórica tras transferencia (ue)	0.8	1.0	1.0	0.9	1.0	0.9	0.3
Zona: TR/central	TR	Central	Central	TR	Central	TR	TR

Tabla 8.2.1-3

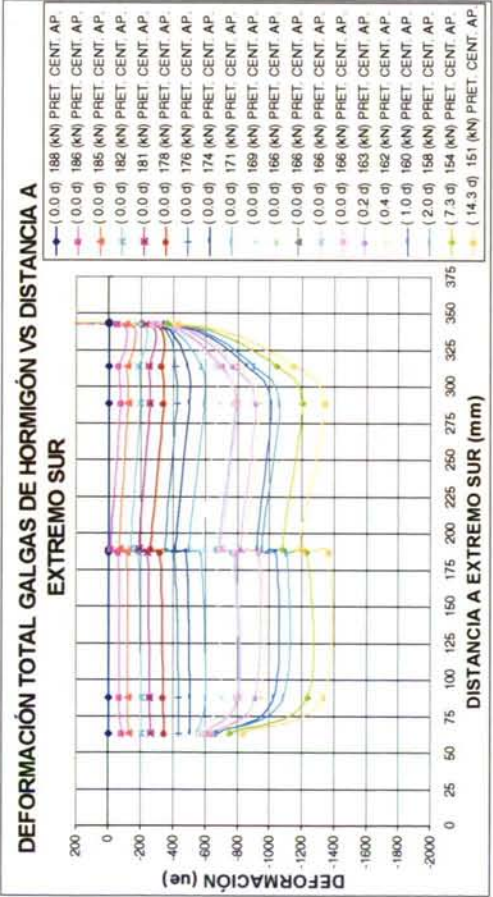
P1L10-1	Anclaje activo	Anclaje pasivo
Deslizamiento máximo (mm)	2.69	2.82
Deslizamiento mínimo (mm)	2.56	2.68



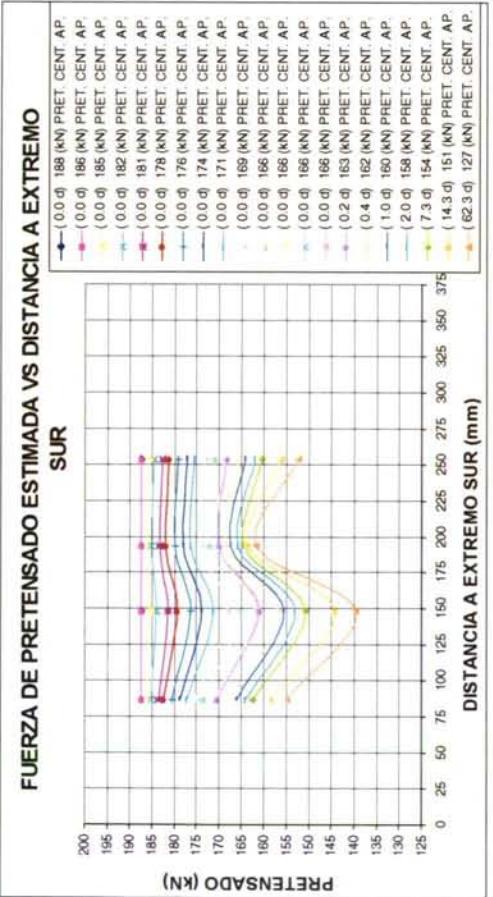
Gráfica 8.2.1-2



Gráfica 8.2.1-4

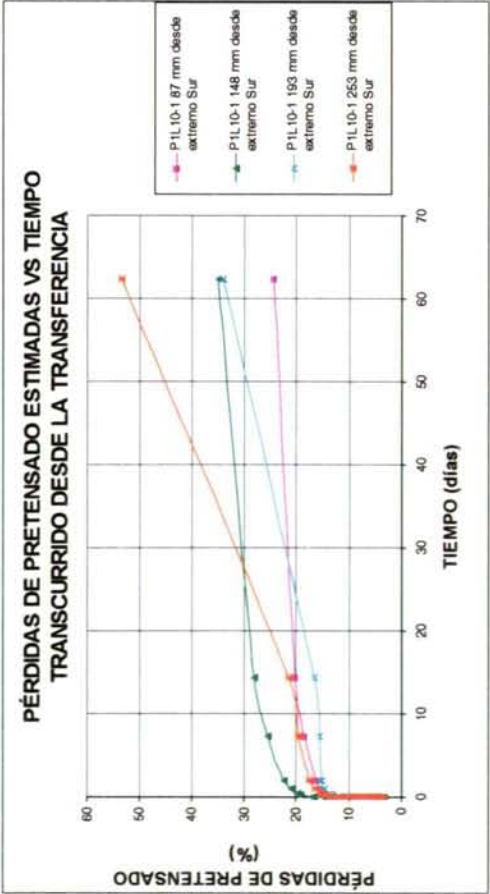


Gráfica 8.2.1-1

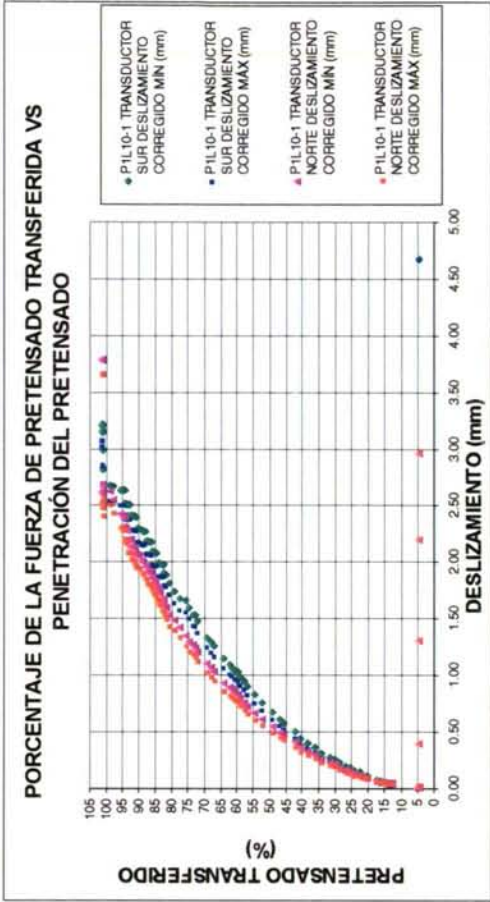


Gráfica 8.2.1-3

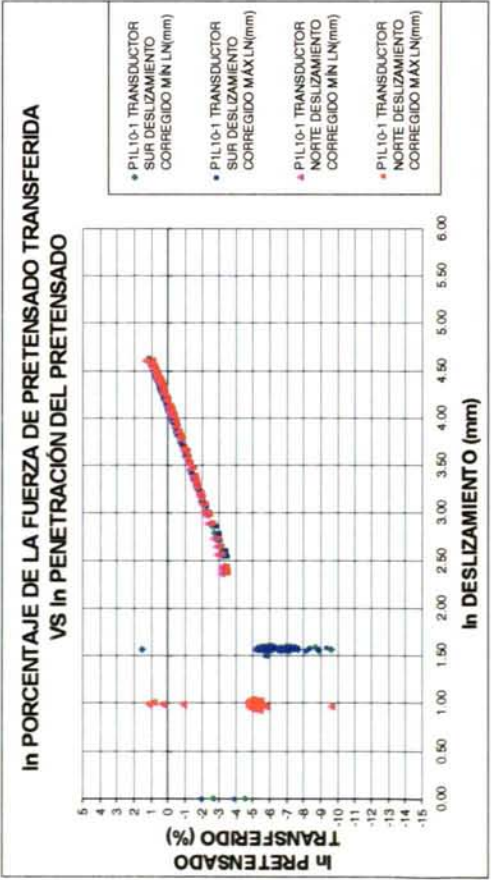




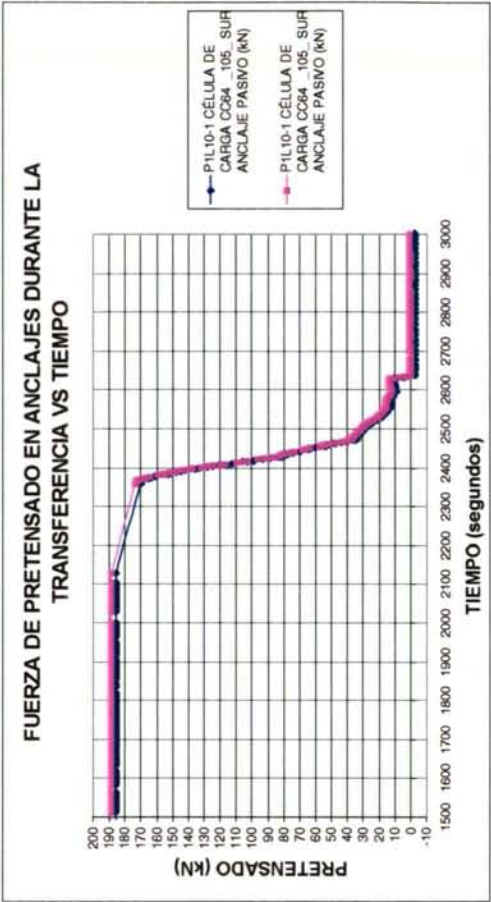
Gráfica 8.2.1-5



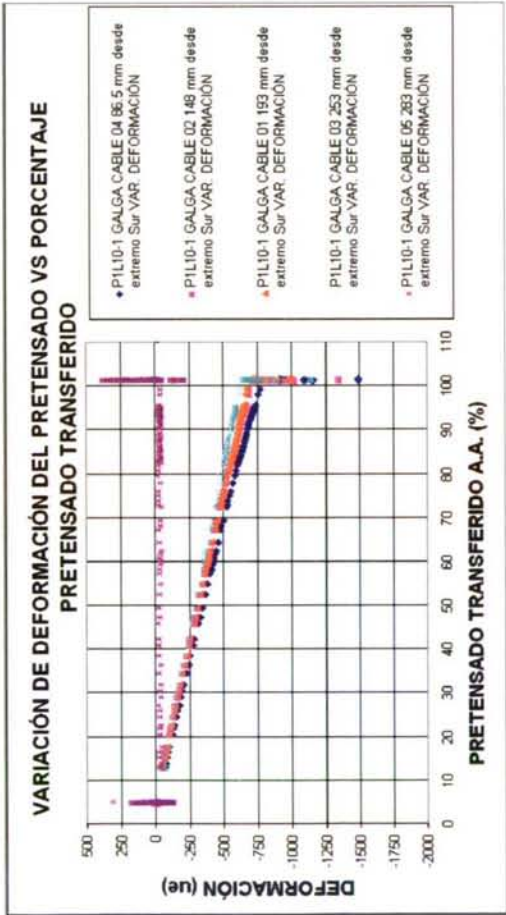
Gráfica 8.2.1-6



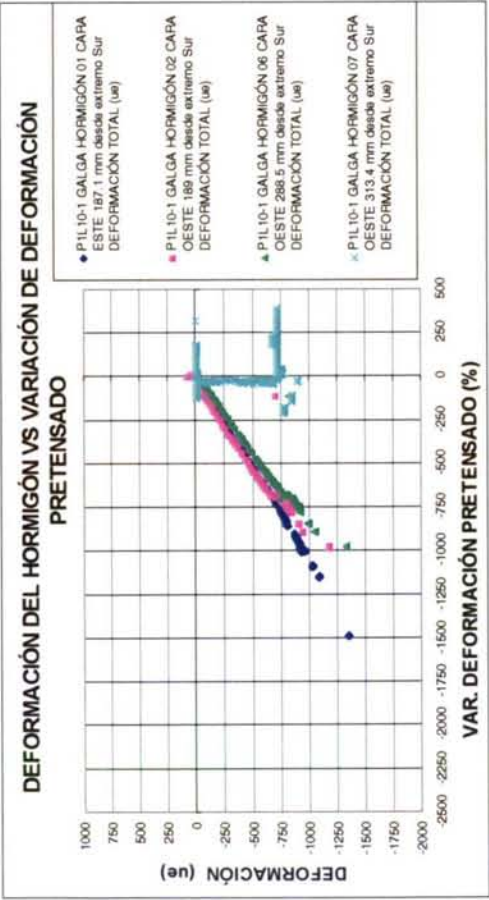
Gráfica 8.2.1-7



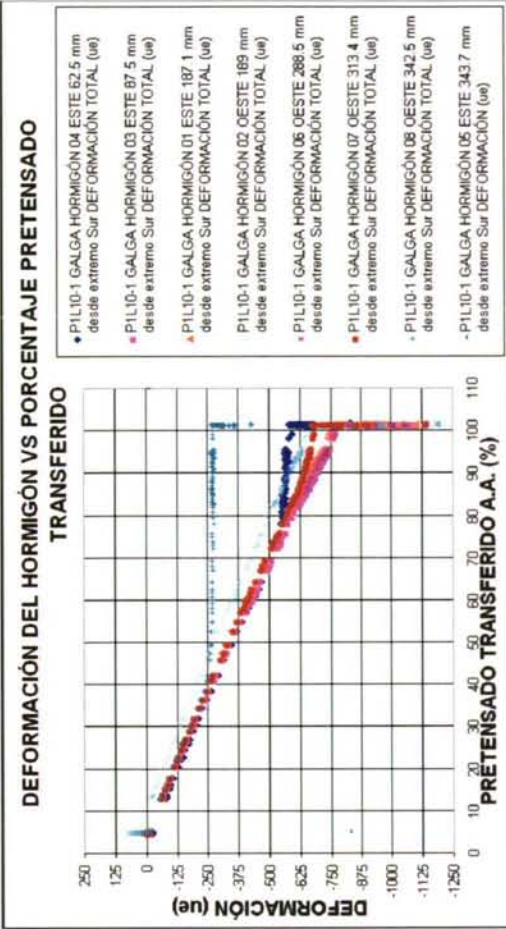
Gráfica 8.2.1-8



Gráfica 8.2.1-9



Gráfica 8.2.1-11



Gráfica 8.2.1-10



### 8.2.2. Prisma P2L10-1

En la Gráfica 8.2.2-1 se observan las leyes de deformación total de las galgas de cable a lo largo del tiempo. Todas las galgas de cable funcionaron durante la transferencia, y hasta dos meses y medio después de la misma. La deformación representada se refiere a la deformación del alambre a la altura donde está adherida la banda. Se aprecia una cierta dispersión en la deformación total inicial entre bandas, debido probablemente a las diferencias entre las deformaciones de los alambres exteriores. El fallo de las bandas al cabo de los tres meses puede estar motivado por el adhesivo.

En la Gráfica 8.2.2-2 se observa la ley de deformaciones longitudinales en el hormigón durante la transferencia, y a diferentes edades. Se aprecia que al inicio de la transferencia la deformación es constante en todas las bandas extensométricas, a lo largo del prisma, lo que puede estar motivado por la adherencia de contacto/mecánica. Cuando la fuerza transferida alcanza el 25% (véase también la Gráfica 8.2.2-11) se aprecia cómo se va incurvando la ley en las galgas más extremas, presentando deformaciones menores en la zona de transferencia. Analizando la ley, una vez transferido todo el pretensado, se observa cómo la longitud de transmisión aparente no supera un metro de longitud en ambos extremos.

En la Gráfica 8.2.2-3 se aprecia que la fuerza de pretensado resultante tras la transferencia es menor en los extremos, y en mayor medida en el extremo Norte (extremo activo). La fuerza de pretensado disminuye paulatinamente tras la transferencia (Gráfica 8.2.2-5), hasta los 50 días desde la misma. Las medidas correspondientes a los 105 días son poco fiables, probablemente debido al fallo del adhesivo.

En la Gráfica 8.2.2-4 se observa el aumento de las pérdidas de pretensado, desde un 15% inmediatamente tras la transferencia, hasta un 30% al cabo de dos meses, lo que constituye un valor muy elevado. Estas pérdidas se observan en todas las galgas de cable, por lo que cabe pensar que son debidas a la fisuración longitudinal generalizada. En la Gráfica 8.2.2-6 se aprecia la evolución de las pérdidas con el tiempo.

En la Gráfica 8.2.2-7 se representa el porcentaje de la fuerza de pretensado transferida respecto a la penetración del pretensado en ambos extremos. En este prisma la penetración es superior en el extremo Norte, contiguo al corte, lo cual parece más lógico que lo sucedido en el prisma P1L10-1 (Apartado 8.2.1). Al igual que en el prisma anterior, si representamos en escala logarítmica ambos ejes (Gráfica 8.2.2-8), se aprecia una gran linealidad de las leyes resultantes, con coeficiente  $R^2$  superior a 0.99.

La transferencia fue gradual, con una duración aproximada de diez minutos (Gráfica 8.2.2-9).

Por lo que respecta a la variación de deformación del pretensado respecto al porcentaje de fuerza de pretensado transferida (Gráfica 8.2.2-10), se aprecia una gran linealidad durante la transferencia, y un comportamiento uniforme de todas las galgas de cable. En la galga GC 05, la más contigua al Norte, desde donde se transfiere, se aprecia un cambio de comportamiento para un 85% de fuerza de pretensado transferida.

Por lo que respecta a la deformación de las galgas de hormigón durante la transferencia (Gráfica 8.2.2-11), se observa un comportamiento sensiblemente lineal y uniforme en todas las galgas, hasta la pérdida de adherencia. Esta se aprecia claramente: a partir de un cierto porcentaje de pretensado transferido, la deformación permanece constante, la



sección instrumentada no “retiene” más fuerza de pretensado. Se observa que las galgas que detectan antes la falta de adherencia son las más extremas, lo que es más acusado en las del extremo activo (contiguo al corte).

La adherencia de las galgas centrales se aprecia claramente en la Gráfica 8.2.2-12, en la que se representa la variación de deformación de las galgas de hormigón, respecto a las galgas de cable de aproximadamente la misma sección.

En las Tablas 8.2.2-1 a 8.2.2-3 se presenta un resumen de los resultados obtenidos, relativos a pérdidas de pretensado teóricas y estimadas a partir de la instrumentación, deformaciones detectadas por las galgas de hormigón, y valores de penetración en los anclajes activo y pasivo.

### 8.2.3. Prisma P3L10-1

Este prisma fue el último en fabricarse, por lo que se decidió colocar galgas de hormigón verticales próximas a ambos extremos, a 100 mm aproximadamente (un canto). Por otra parte, este prisma no se retiró de la bancada hasta transcurridos ocho meses de la transferencia, para determinar la posible influencia del movimiento del prisma en la fisuración diferida. Las galgas de cable funcionaron correctamente durante la transferencia, excepto la galga GC5, que falló tras el hormigonado (Figura 8.2.3-1).

En la Gráfica 8.2.3-2 se observa la ley de deformaciones longitudinales en los paramentos del prisma durante la transferencia. Se aprecia que al inicio de la transferencia la deformación es constante a lo largo de la zona instrumentada. Cuando la fuerza transferida alcanza el 60% (Gráfica 8.2.3-11), se va incurvando la ley de las galgas más extremas, presentando deformaciones menores para aquellas situadas cerca de los extremos. Analizando la Gráfica 8.2.3-2, una vez transferido todo el pretensado, se observa cómo la longitud de transmisión aparente no supera el metro de longitud en ambos extremos.

En la Gráfica 8.2.3-3 se aprecia que la fuerza de pretensado aparente resultante tras la transferencia es constante en el tramo instrumentado, lo que indica que las galgas de cable están dentro de la zona central del prisma, de adherencia perfecta. A los 30 días de la transferencia se aprecia el fallo de la galga GC2 (la segunda desde el extremo Sur, Gráfica 8.2.3-5).

En la Gráfica 8.2.3-4 se observa el aumento de las pérdidas desde un 15% inmediatamente después de la transferencia, hasta un 25-30% al cabo de dos meses (Gráfica 8.2.3-6), lo que constituye un valor elevado. Estas pérdidas se observan en todas las galgas de cable.

En la Gráfica 8.2.3-7 se representa el porcentaje de la fuerza de pretensado transferida respecto a la penetración del pretensado en ambos extremos. En este prisma la penetración es superior en el extremo Sur, opuesto al corte. Al igual que en los prismas anteriores, si representamos en escala logarítmica ambos ejes (Gráfica 8.2.3-8), se aprecia una gran linealidad de las leyes resultantes, con un coeficiente  $R^2$  superior a 0.98.

La transferencia fue gradual, de unos ocho minutos de duración aproximada (Gráfica 8.2.3-9).



Tabla 8.2.2-1

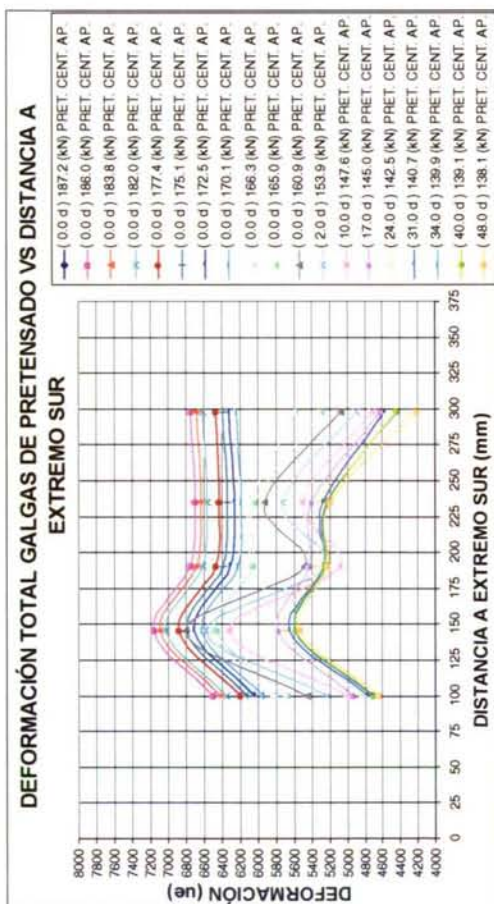
P2L10-1	Fecha tesado	Fecha transferencia	Célula de carga CC64	Célula de carga CC65	Célula de carga CC64	Célula de carga CC65	Galga cable 04	Galga cable 02	Galga cable 01	Galga cable 03	Galga cable 05
	15/02/1999	19/02/99	Sur	Norte	Sur	Norte	100	145	190	235	298
	Tiempo transcurrido desde tesado	Tiempo transcurrido desde transferencia	Anclaje pasivo	Anclaje activo	Anclaje pasivo	Anclaje activo	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur
	Fecha	Segundos	(kN)	(kN)	% Pérdidas	% pérdidas	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente
Pretensado antes transferencia	19/02/99	3.81	0	185.5	188.9	12.8	187.2	187.2	187.2	187.2	187.2
Pretensado tras transferencia	19/02/99	3.83	2153	-2.7	0.1		156.5	164.9	163.4	164.3	137.5
% Pérdidas instantáneas reales							16.4	11.9	12.7	12.2	26.6
% Instantáneas teóricas							11.1	11.1	11.1	11.1	11.1
% Pérdidas reales / % Pérdidas teóricas tras transferencia							1.5	1.1	1.1	1.1	2.4
Zona: TR/central							TR	Central	Central	Central	TR

Tabla 8.2.2-2

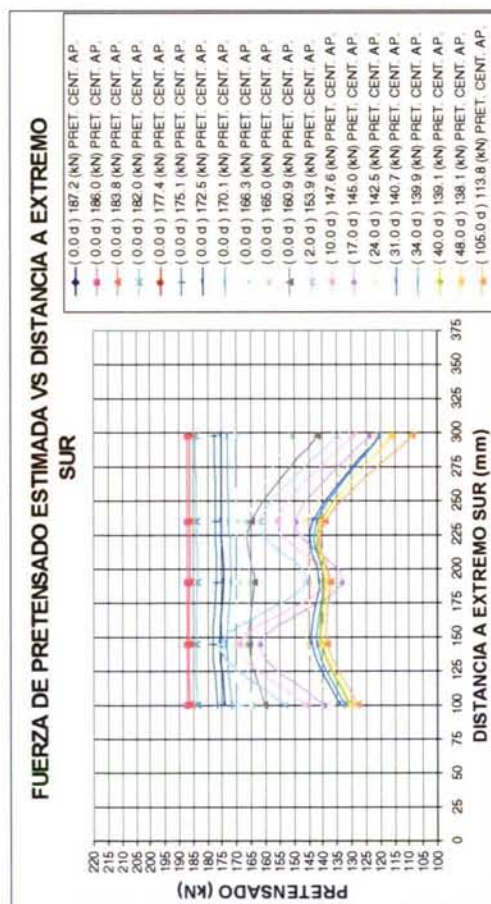
P2L10-1											
Galga hormigón	05	04	03	01	02	6	07	08			
Cara	Este	Este	Este	Este	Oeste	Oeste	Oeste	Oeste			
Distancia desde el extremo sur (mm)	31.9	61.8	95.1	191.3	190.1	285.1	315	336			
Def. real antes transferencia (ue)	0	0	0	0	0	0	0	0			
Def. real tras transferencia (ue)	-353	-559	-837	-829	-738	-657	-455	-223			
Def. teórica tras transferencia (ue)	-739	-739	-739	-739	-739	-739	-739	-739			
Def. real / def. teórica tras transferencia	0.5	0.8	1.1	1.1	1.0	0.9	0.6	0.3			
Zona: TR/central	TR	TR	Central	Central	Central	TR	TR	TR			

Tabla 8.2.2-3

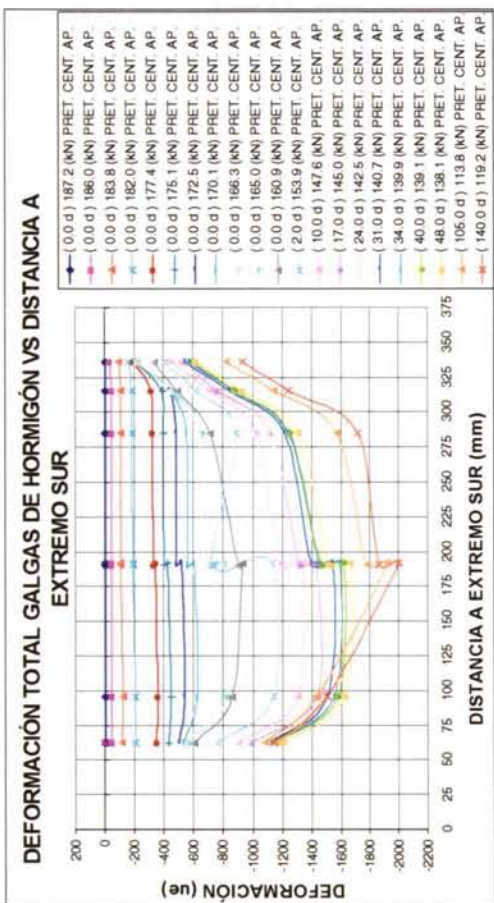
P2L10-1	Anclaje activo	Anclaje pasivo
Deslizamiento máximo (mm)	3.21	2.97
Deslizamiento mínimo (mm)	3.08	2.84



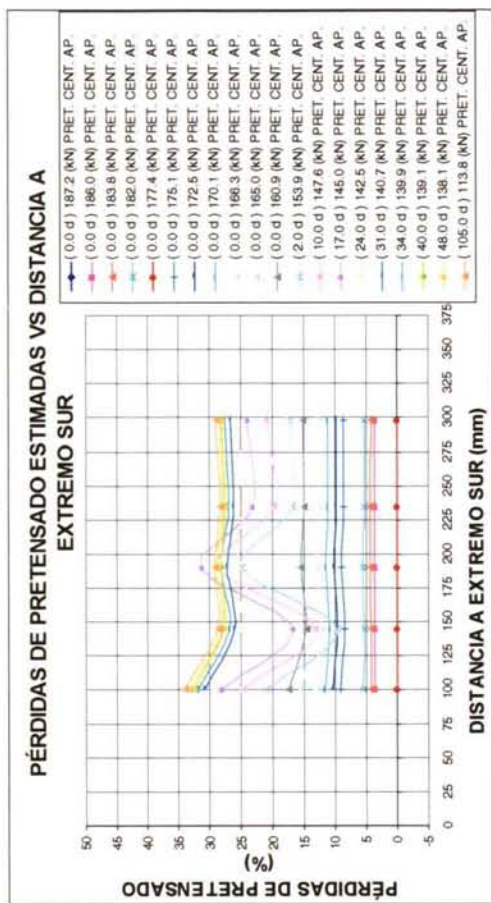
Gráfica 8.2.2-1



Gráfica 8.2.2-3

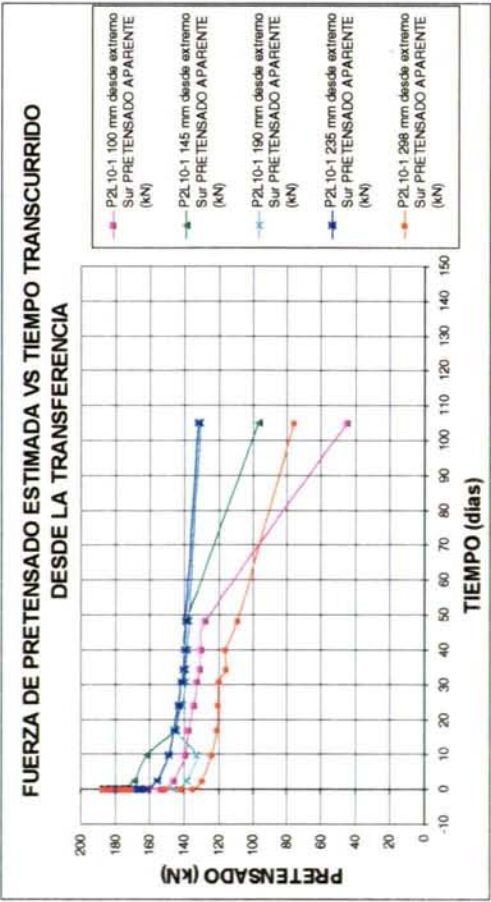


Gráfica 8.2.2-2

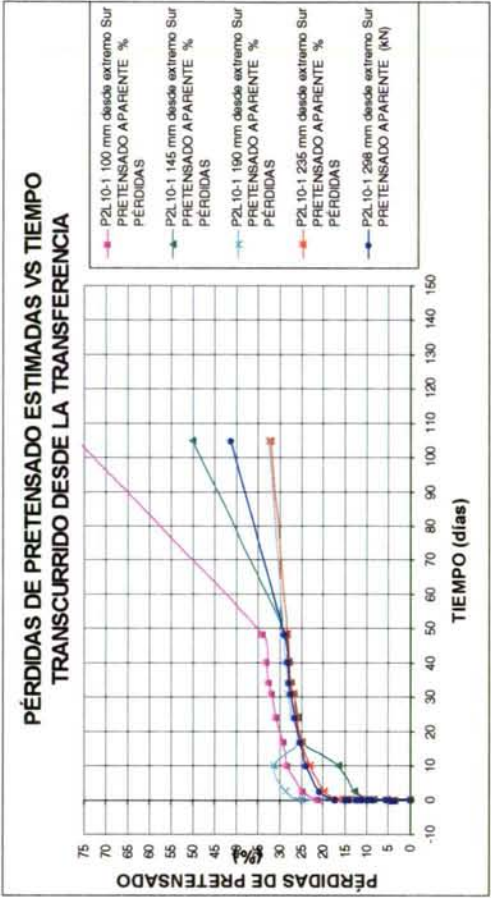


Gráfica 8.2.2-4

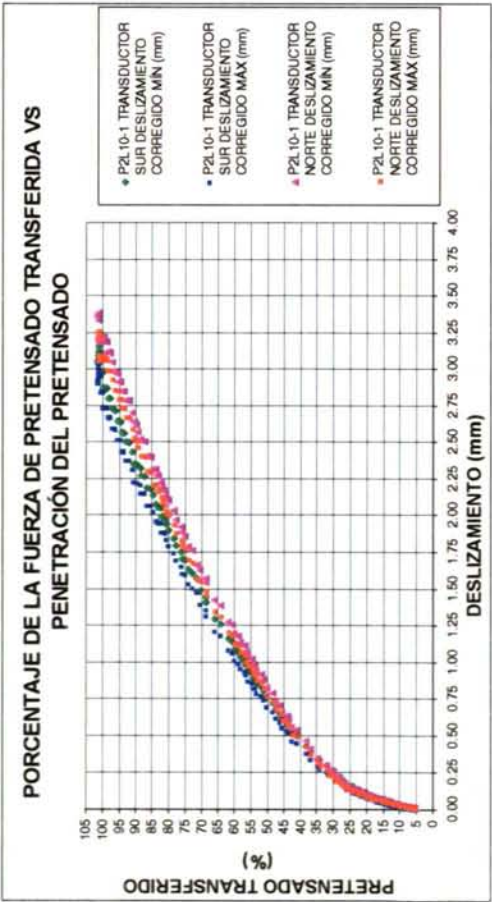




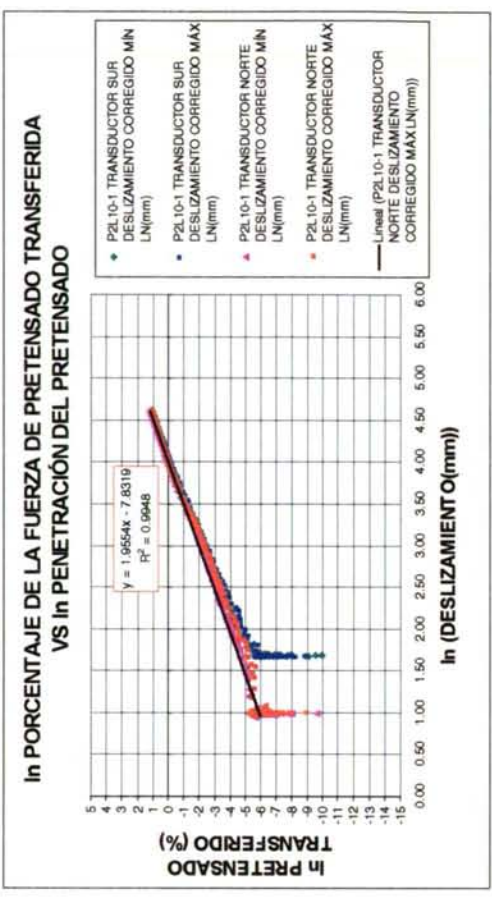
Gráfica 8.2.2-5



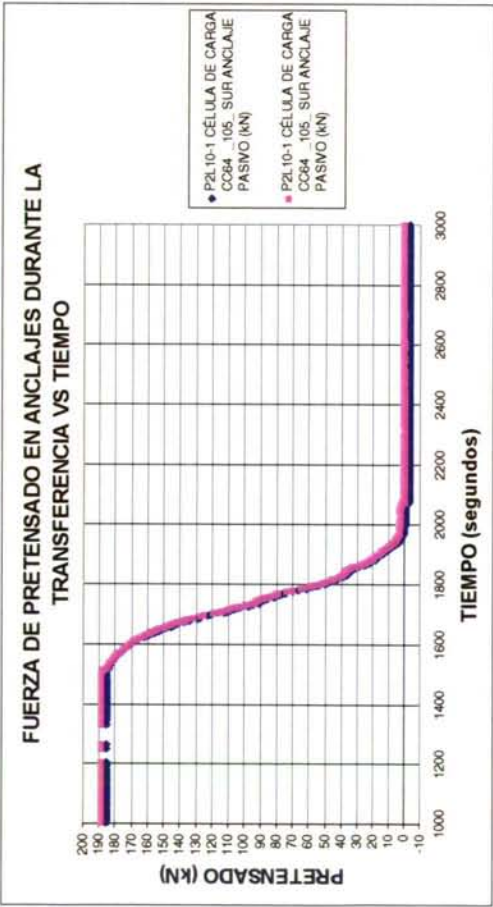
Gráfica 8.2.2-6



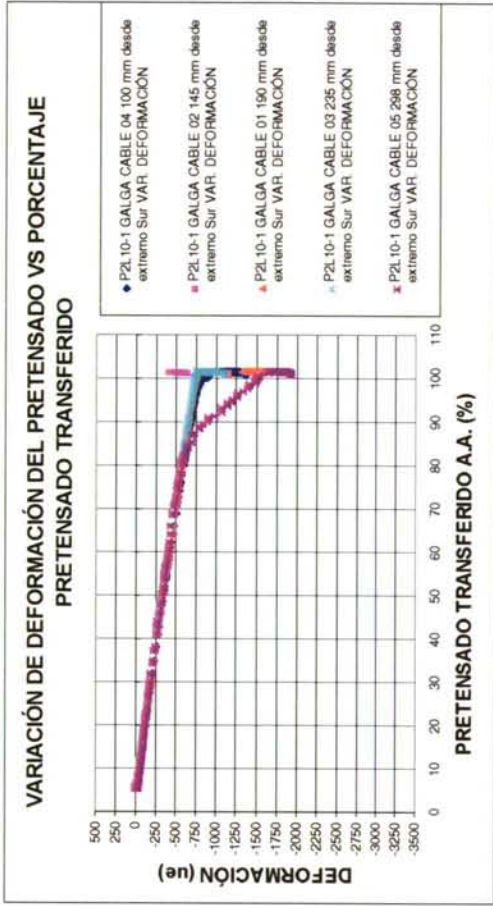
Gráfica 8.2.2-7



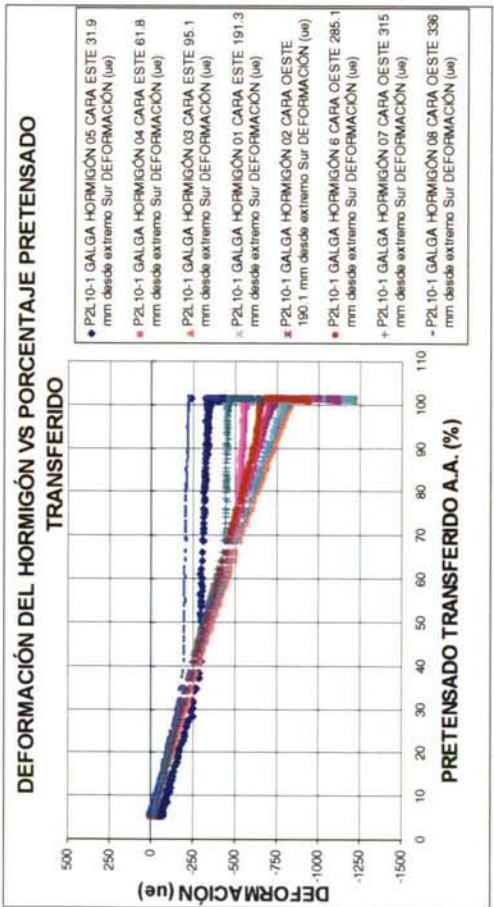
Gráfica 8.2.2-8



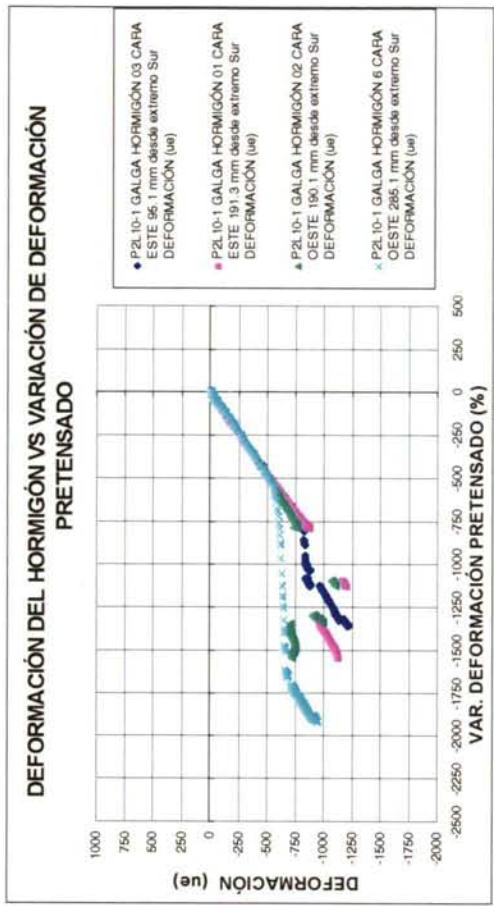
Gráfica 8.2.2-9



Gráfica 8.2.2-10



Gráfica 8.2.2-11



Gráfica 8.2.2-12



La variación de deformación de las galgas de pretensado durante la transferencia es lineal marcadamente lineal respecto al porcentaje de pretensado transferido (Gráfica 8.2.3-10), para todas las galgas de cable. Esto significa que la longitud de transmisión inicial, inmediatamente tras la transferencia no superó los 90 cm en el extremo Sur (GC04), ni los 96 cm en el extremo Norte (GC01). Se aprecia la disminución de deformación de pretensado debida a las pérdidas.

En las Gráficas 8.2.3-11 y 8.2.3-12 se observa el comportamiento de las galgas de hormigón, respecto al porcentaje de pretensado transferido, y respecto a la variación de deformación del pretensado respectivamente. Se aprecia el fallo de la galga GH09. El comportamiento de las galgas centrales indica adherencia perfecta (Gráfica 8.2.3-12).

La deformación registrada tras la transferencia por las galgas de hormigón GH9 y GH10, de 94 ue aproximadamente (véase la Gráfica 8.2.3-13), corresponde a una tensión aproximada de 1.8 MPa en la sección instrumentada. Esta tensión es considerable respecto a la resistencia a tracción directa a la edad de transferencia, del 75% aproximadamente. Las tensiones de tracción originadas tras la transferencia en los prismas son suficientes para que, según los ensayos de otros investigadores acerca del cansancio a tracción (FOUR85a, FOUR85b), se desencadene este fenómeno. De hecho se aprecia en la gráfica el aumento de deformación, debido a los fenómenos diferidos, hasta la rotura de ambas galgas, provocada por las fisuras longitudinales de hendimiento que las atravesaron, a los 41 días de la transferencia.

En la Gráfica 8.2.3-14 se aprecia el comportamiento de la penetración del pretensado en ambos extremos, valor que aumenta aproximadamente 0.25 mm respecto al valor correspondiente al final de la transferencia, a los 18-20 días después de ésta. Este aumento sólo puede estar producido por una pérdida de adherencia diferida.

En las Tablas 8.2.3-1 a 8.2.3-3 se presenta un resumen de los resultados obtenidos, relativos a pérdidas de pretensado teóricas y estimadas a partir de la instrumentación, deformaciones detectadas por las galgas de hormigón, y valores de penetración en los anclajes activo y pasivo.

Este prisma fisuró longitudinalmente, al igual que el resto de los prismas de hormigón ligero. La fisuración se detectó visualmente al cabo de un mes de la transferencia.

Tabla 8.2.3-1

Prisma:	P3L10-1	Fecha tesado:	Fecha transferencia:	Célula de carga CC64	Célula de carga CC65	Célula de carga CC64	Célula de carga CC65	Célula de carga CC64	Galga cable 02	Galga cable 03	Galga cable 04
		09/03/1999	12/03/99	Sur	Norte	Sur	Norte	89	144	184	224
		Tiempo transcurrido desde tesado	Tiempo transcurrido desde transferencia	Anclaje pasivo	Anclaje activo	Anclaje pasivo	Anclaje activo	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur
	Fecha	Días	Segundos	(kN)	(kN)	% pérdidas	% pérdidas	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente
Pretensado antes transferencia	12/03/99	2.80	0	186.9	189.6	3.8	3.6	188.3	188.3	188.3	188.3
Pretensado tras transferencia	12/03/99	2.81	920	-0.9	1.8			168.4	169.9	168.6	168.8
% Pérdidas instantáneas reales								10.5	9.8	10.5	10.3
% Instantáneas teóricas								11.0	11.0	11.0	11.0
% Pérdidas reales / % pérdidas teóricas tras transferencia								1.0	0.9	1.0	0.9
Zona: TR/central								Central	Central	Central	Central

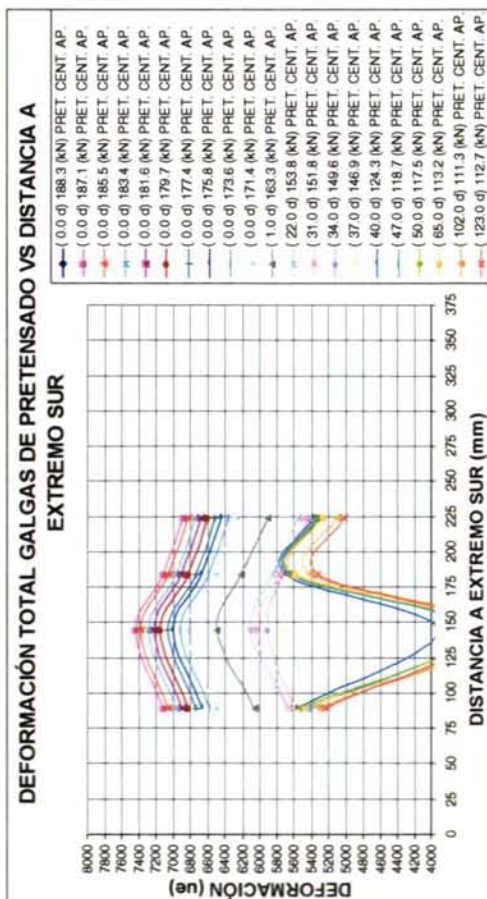
Tabla 8.2.3-2

Prisma:		P3L10-1						
Galga de hormigón		04	03	01	02	06	07	
Posición galga/cara		Este	Este	Este	Oeste	Oeste	Oeste	
Distancia desde el extremo sur (mm)		91.1	190.5	185.4	284.2	316.3	368.2	
Def. real antes transferencia (ue)		0	0	0	0	0	0	
Def. real tras transferencia (ue)		-494	-753	-764	-743	-794	-561	
Def. teórica tras transferencia (ue)		-734	-734	-734	-734	-734	-734	
Def. real /def. teórica tras transferencia		0.7	1.0	1.0	1.0	1.1	0.8	
Zona: TR/central		TR	Central	Central	Central	Central	TR	

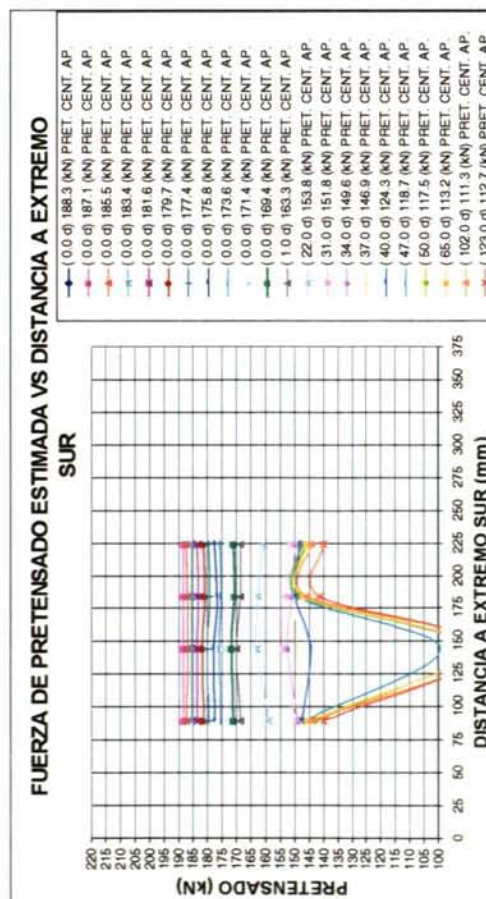
Tabla 8.2.3-3

P3L10-1	Anclaje activo	Anclaje pasivo
Deslizamiento máximo (mm)	2.66	2.90
Deslizamiento mínimo (mm)	2.53	2.77

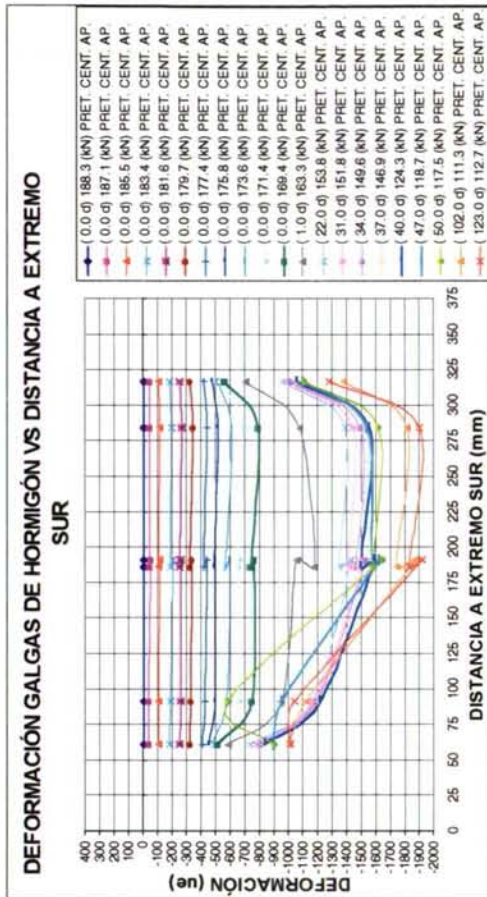




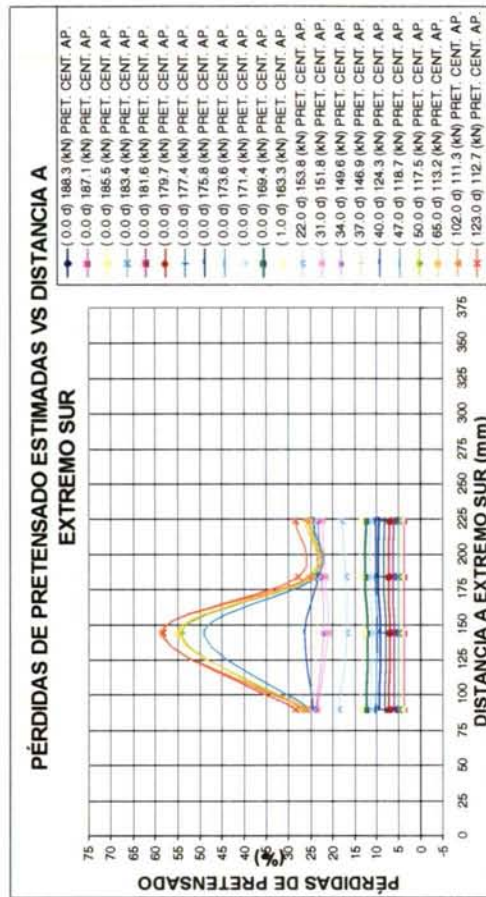
Gráfica 8.2.3-1



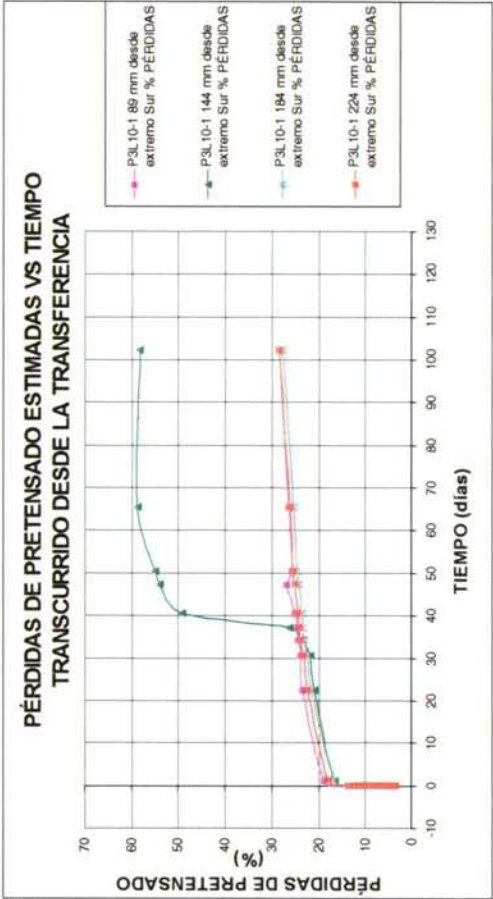
Gráfica 8.2.3-3



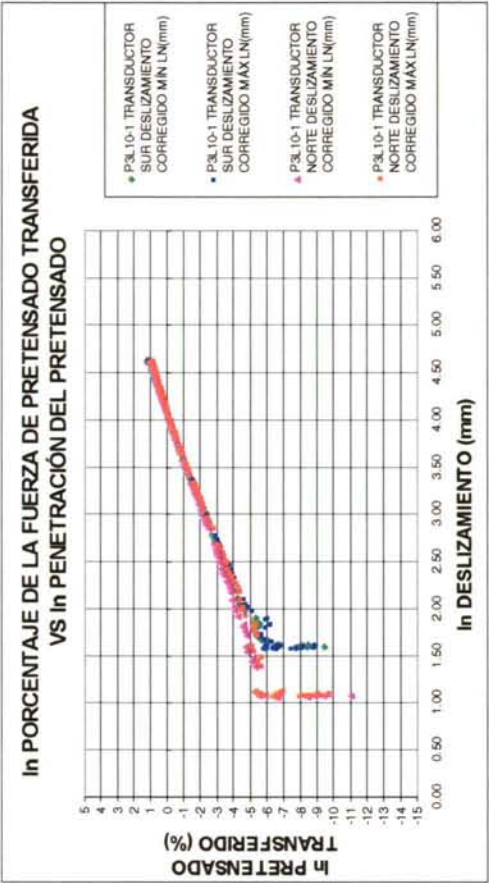
Gráfica 8.2.3-2



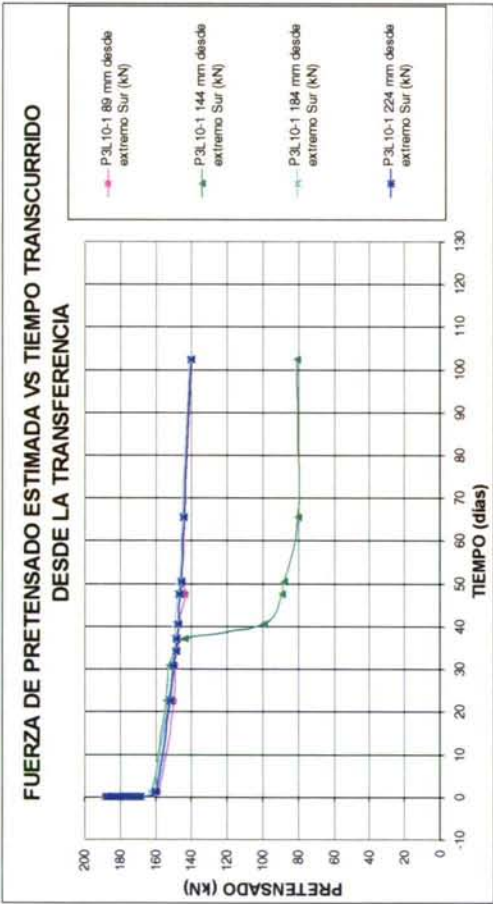
Gráfica 8.2.3-4



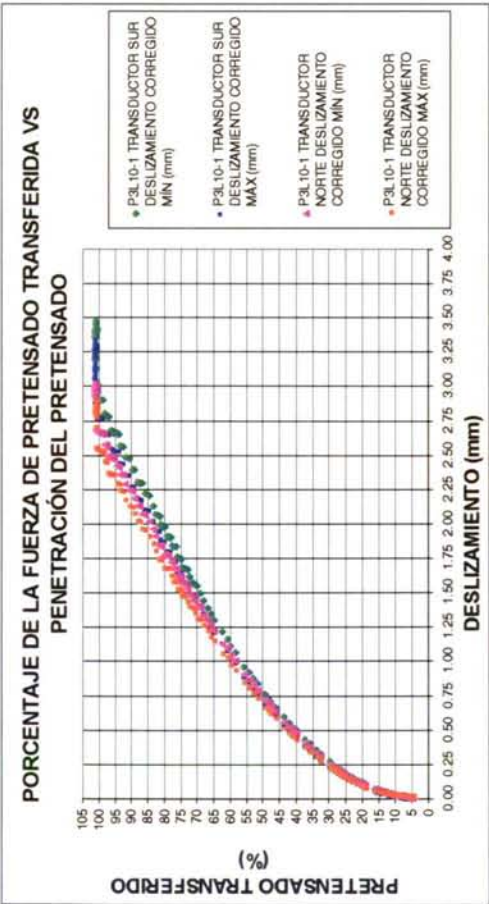
Gráfica 8.2.3-6



Gráfica 8.2.3-8

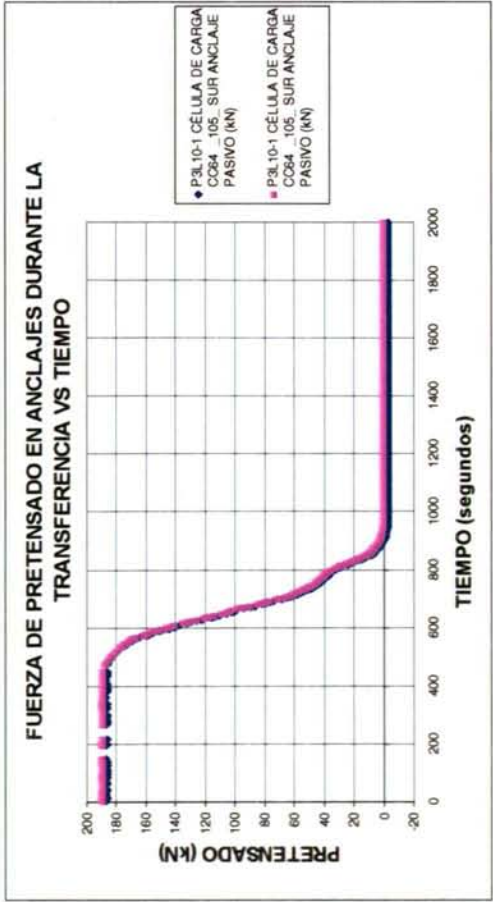


Gráfica 8.2.3-5

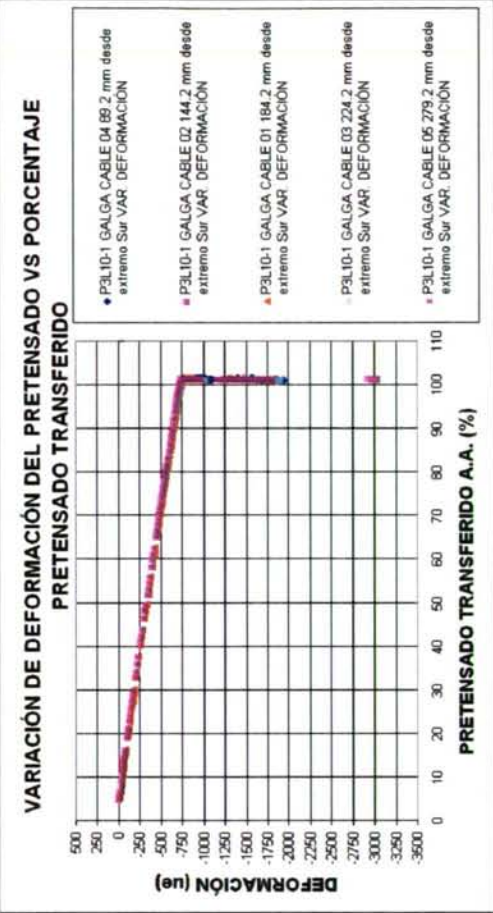


Gráfica 8.2.3-7

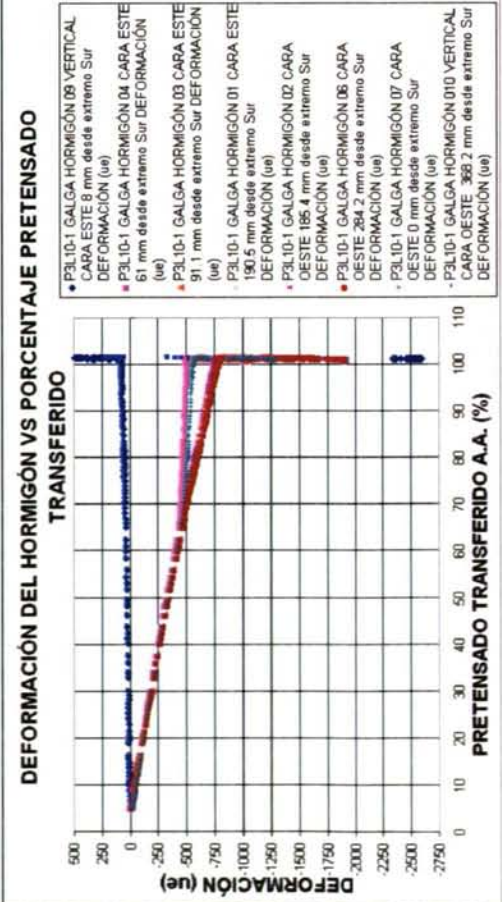




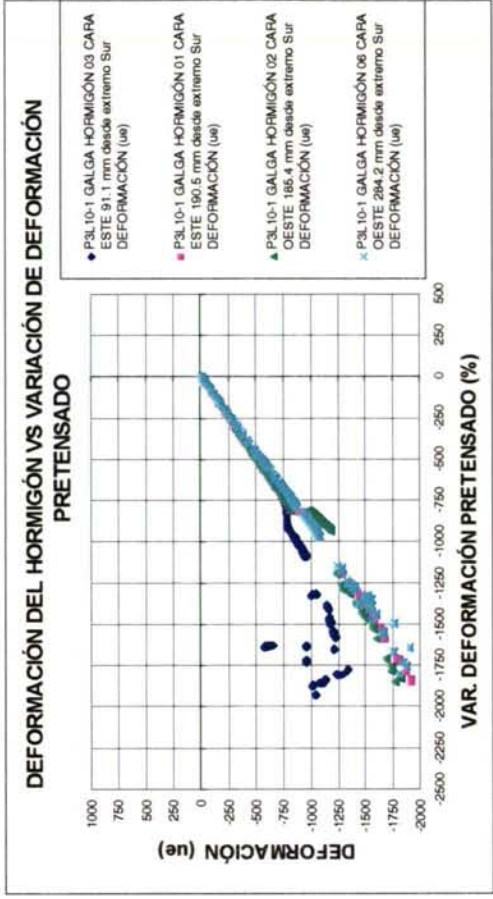
Gráfica 8.2.3-9



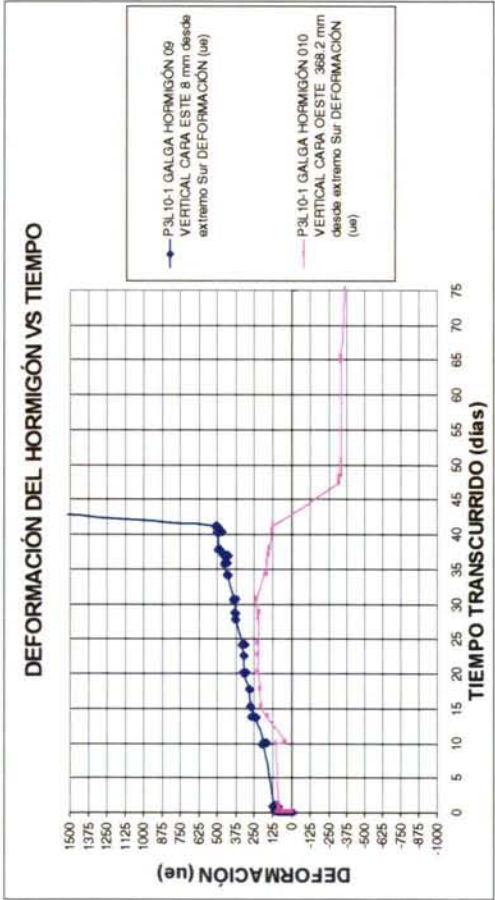
Gráfica 8.2.3-10



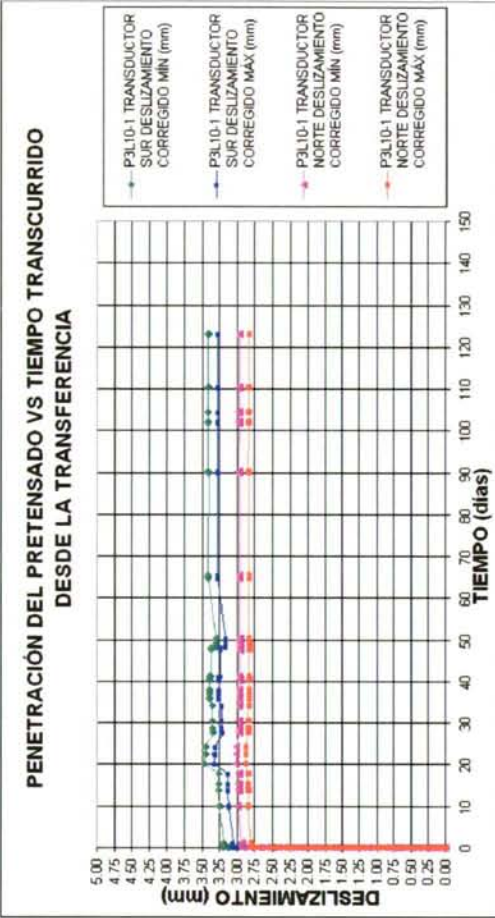
Gráfica 8.2.3-11



Gráfica 8.2.3-12



Gráfica 8.2.3-13



Gráfica 8.2.3-14



#### 8.2.4. Prisma P1L3-1

La transferencia se realizó, al igual que en el resto de los prismas, con soplete de oxígeno-propano. Durante el proceso rompieron sucesivamente, de una manera violenta, varios alambres (como se puede observar en la Gráfica 8.2.4-9). El corte del cable se realizó, como es habitual, tras haber alcanzado tensión nula en el cordón. La transferencia duró aproximadamente 150 segundos, respecto a los 550 segundos de media de los prismas de los apartados anteriores. Tras la transferencia se detectó la rotura del hormigón en el extremo contiguo al corte del prisma (Gráfica 8.2.4-9). La superficie de rotura es sensiblemente cónica, con eje de simetría el propio cable. El ángulo del cono es de aproximadamente  $45^\circ$ .

A nuestro juicio la rotura se debe a la transferencia súbita, producida al romper varios de los alambres. Creemos que el impacto ejercido por los alambres al enderezarse fue la causa del desprendimiento del hormigón. Obsérvese en las Fotografías 8.2.4-1 y 8.2.4-2 el sentido de torsión de los alambres del cable, así como el sentido de giro de los alambres al recuperar la configuración recta (mínima energía), al perder la tensión. Las manchas oscuras presentes en la cara de fractura del hormigón se corresponden con granos de arlita rotos. Se aprecia una forma de rotura mayoritariamente transgranular.



Fotografía 8.2.4-1



Fotografía 8.2.4-2

Las galgas de cable funcionaron durante el tesado, pero se produjo el fallo de las mismas antes del hormigonado, por lo que se reemplazaron. En la Gráfica 8.2.4-1 se aprecia que las deformaciones totales están referidas a un instante posterior al tesado, por lo que su valor es reducido. En la Gráfica 8.2.4-2 se aprecia que la mitad de las galgas de hormigón fallaron.

La fuerza de pretensado estimada a partir de las medidas de deformación de las galgas de cable presenta una uniformidad considerable durante la primera etapa de la transferencia (Gráfica 8.2.4-3). Al finalizar la misma se detecta una disminución en el extremo Sur. Se aprecia el fallo de las galgas del extremo Sur, a partir del mes de la transferencia.

En la Gráfica 8.2.4-4 se observa el aumento de las pérdidas totales, referidas a la fuerza de pretensado inicial, de un 15-20% inmediatamente tras la transferencia, hasta un 25-30% al cabo de mes y medio. Las pérdidas se disparan en ambos extremos a partir de los dos meses. Aparentemente, a esa edad se produce el fallo de las galgas del extremo

Sur. Las pérdidas del extremo Norte pueden estar debidas a la progresión de la fisuración diferida por hendimiento. En esta gráfica y en la siguiente (Gráfica 8.2.4-6) se aprecia el fallo de las galgas de pretensado GC1 y GC2 (primera y segunda desde el extremo Sur, respectivamente). El fallo se produjo al cabo de una semana de la transferencia, probablemente debido a un fallo del adhesivo o de la protección.

En la Gráfica 8.2.4-7 se representa el porcentaje de la fuerza de pretensado transferida respecto a la penetración del pretensado en ambos extremos. Debido a la transferencia súbita y a la rotura en el extremo Norte, no se aprecia una tendencia clara. En la Gráfica 8.2.4-8, representando en escala logarítmica ambos ejes, se aprecia una tendencia lineal, que presenta una correlación más pobre que en los prismas anteriores (Apartados 8.2.1 a 8.2.3).

La variación de deformación del pretensado respecto a la fuerza de pretensado transferida es sensiblemente lineal a lo largo de la transferencia (Gráfica 8.2.4-10). La dispersión es considerablemente superior en la deformación registrada por las galgas de hormigón (Gráfica 8.2.4-11).

Representando la variación de deformación del hormigón y de las galgas de cable correspondientes a una misma sección transversal (Gráfica 8.2.4-12), se aprecia la adherencia perfecta en la zona central del prisma (galgas GH1, GH2 y GH6).

En las Tablas 8.2.4-1 a 8.2.4-3 se presenta un resumen de los resultados obtenidos, relativos a pérdidas de pretensado teóricas y estimadas a partir de la instrumentación, deformaciones detectadas por las galgas de hormigón, y valores de penetración en los anclajes activo y pasivo.

Este prisma, además de la rotura del extremo activo durante la transferencia, presentó fisuras longitudinales, detectadas al cabo de mes y medio de la transferencia.



Tabla 8.2.4-1

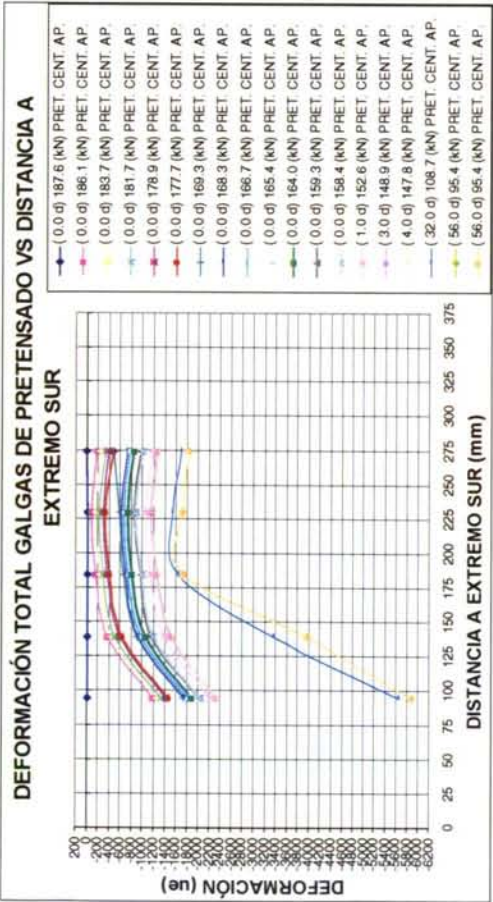
Prisma:	P1L3-1	Fecha tesado:	Fecha transferencia:	Célula de carga CC64	Célula de carga CC65	Célula de carga CC64	Célula de carga CC65	Galga cable 01	Galga cable 02	Galga cable 03	Galga cable 05
		25/01/1999	28/01/99	Sur	Norte	Sur	Norte	184.2	144.2	224.2	279.2
		Tiempo transcurrido desde tesado	Tiempo transcurrido desde transferencia	Anclaje pasivo	Anclaje activo	Anclaje pasivo	Anclaje activo	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur
	Fecha	Días	Segundos		(kN)		% pérdidas	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente
Pretensado antes transferencia	28/01/99	2.99	0	188.2	187.1	11.5	12.2	187.6	187.6	187.6	187.6
Pretensado tras transferencia	28/01/99	3.00	949	-2.2	0.1			164.2	163.8	164.6	164.6
%Pérdidas instantáneas reales								12.5	12.7	12.3	12.2
%Instantáneas teóricas								11.3	11.3	11.3	11.3
%Pérdidas reales / %pérdidas teóricas tras transferencia								1.1	1.1	1.1	1.1
Zona: TR/central								Central	Central	Central	Central

Tabla 8.2.4-2

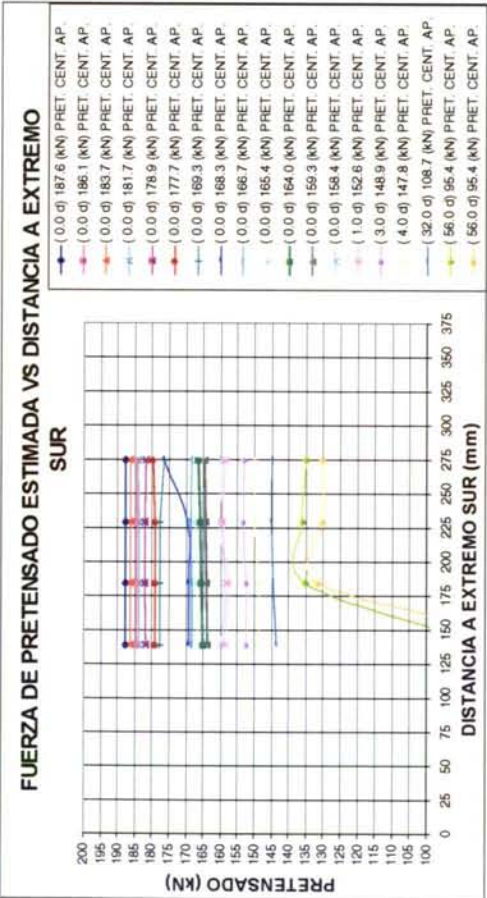
Prisma:		P1L3-1							
Galga hormigón		05	04	03	02	01	06	08	
Cara		Este	Este	Este	Oeste	Este	Oeste	Oeste	
Distancia desde el extremo sur (mm)		30.6	61.2	96.5	185	186.5	278.8	344	
Def. real antes transferencia (ue)		0	0	0	0	0	0	0	
Def. real tras transferencia (ue)		-344	-667	68	-700	-779	-708	-293	
Def. teórica tras transferencia (ue)		-755	-755	-755	-755	-755	-755	-755	
Def. real /def. teórica tras transferencia		0.5	0.9	-0.1	0.9	1.0	0.9	0.4	
Zona: TR/central		TR	TR	Fallo	Fallo	Central	TR	TR	

Tabla 8.2.4-3

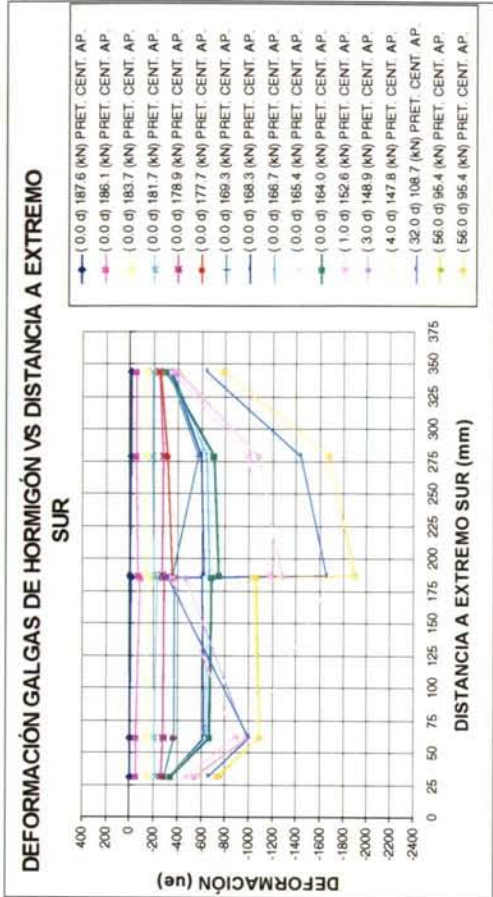
P1L3-1		Anclaje activo	Anclaje pasivo
Deslizamiento máximo (mm)		3.38	2.25
Deslizamiento mínimo (mm)		3.24	2.11



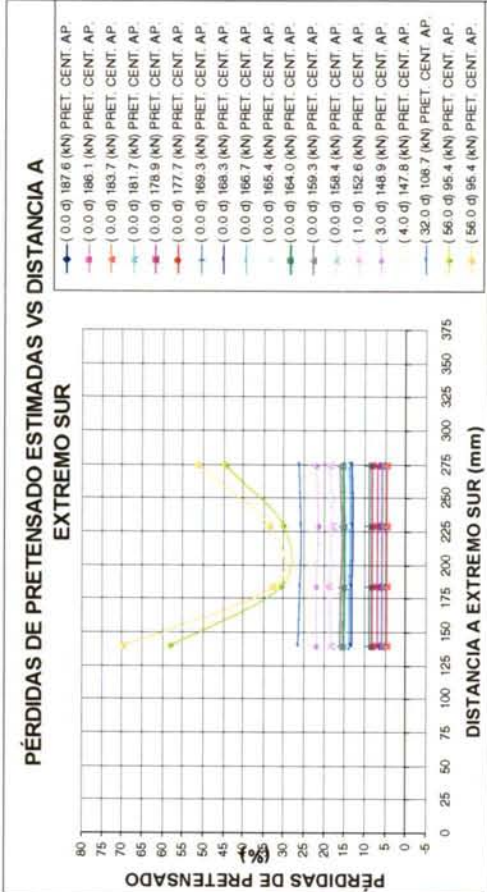
Gráfica 8.2.4-1



Gráfica 8.2.4-3

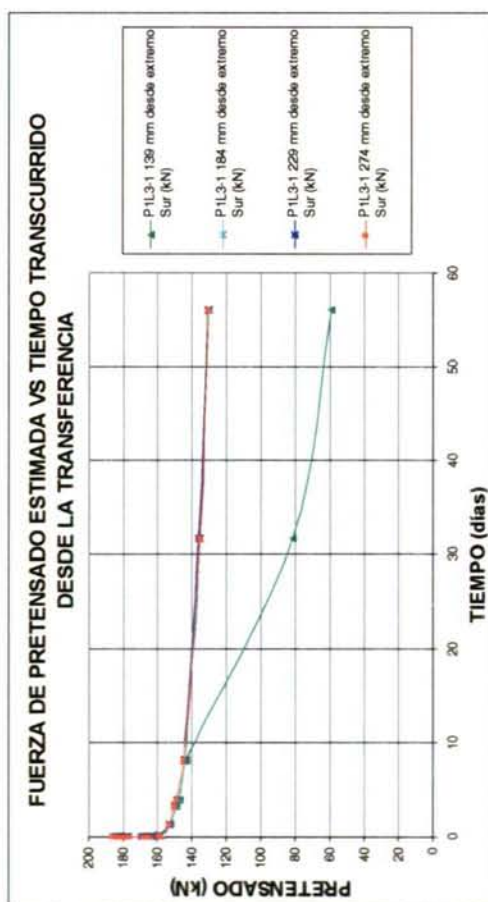


Gráfica 8.2.4-2

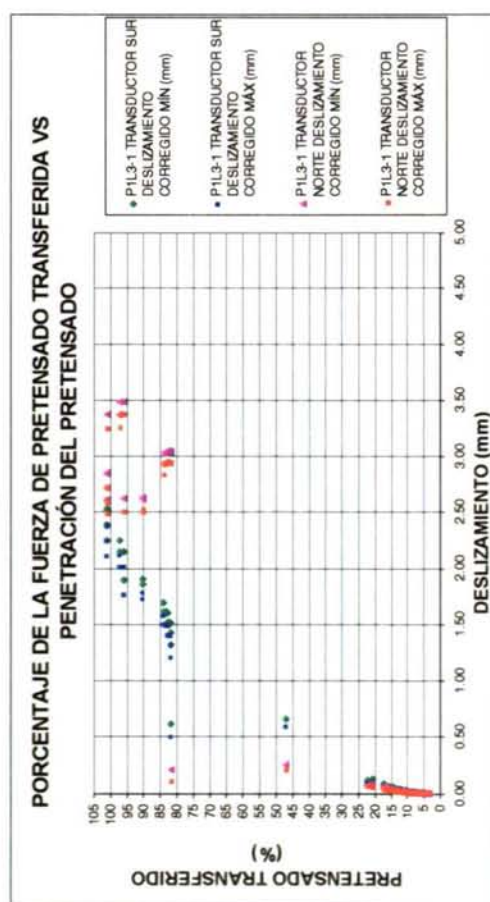


Gráfica 8.2.4-4

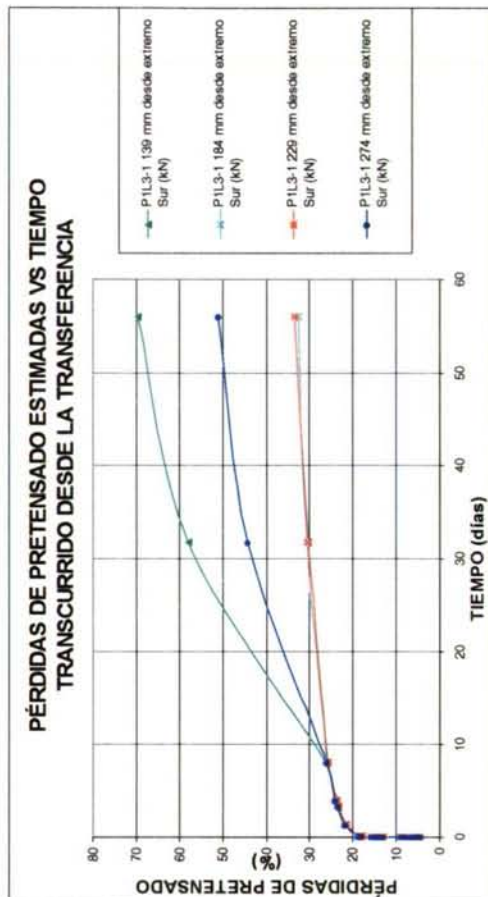




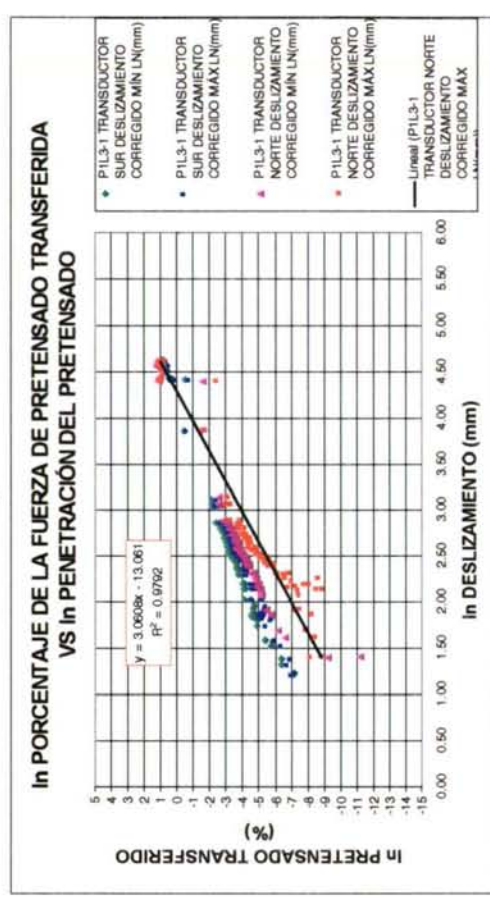
Gráfica 8.2.4-5



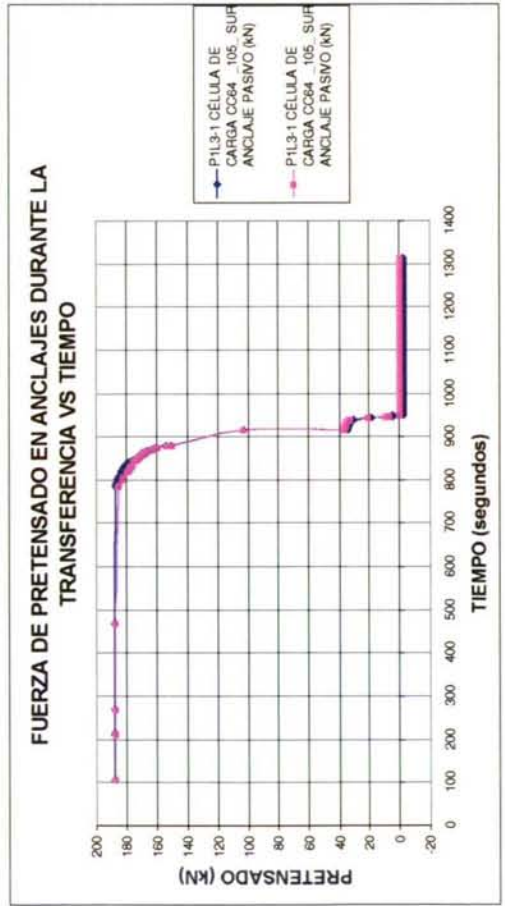
Gráfica 8.2.4-7



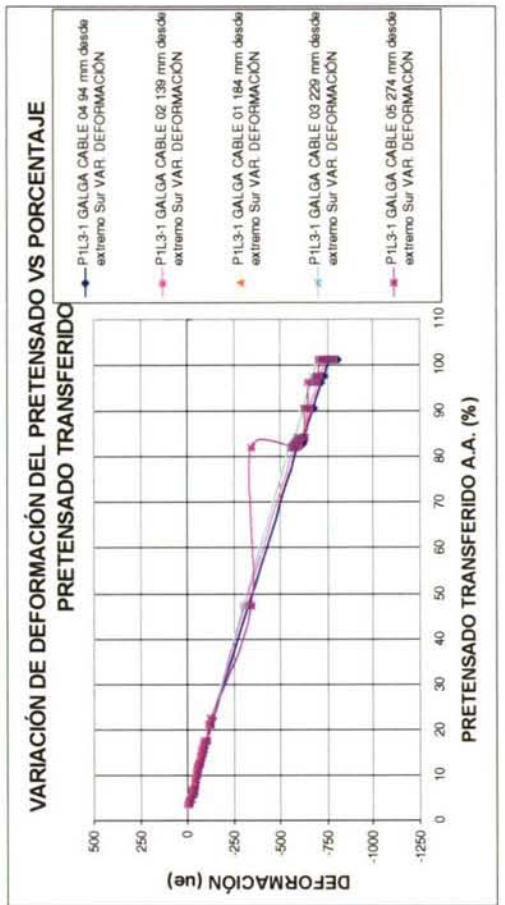
Gráfica 8.2.4-6



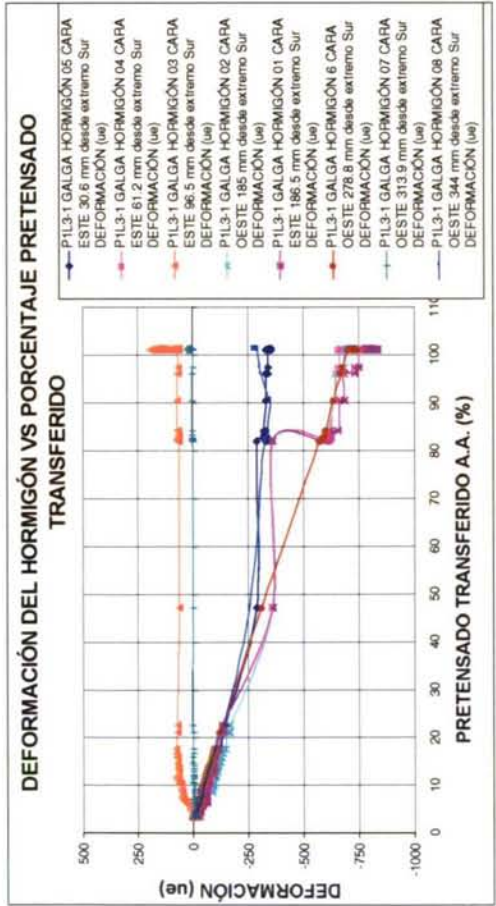
Gráfica 8.2.4-8



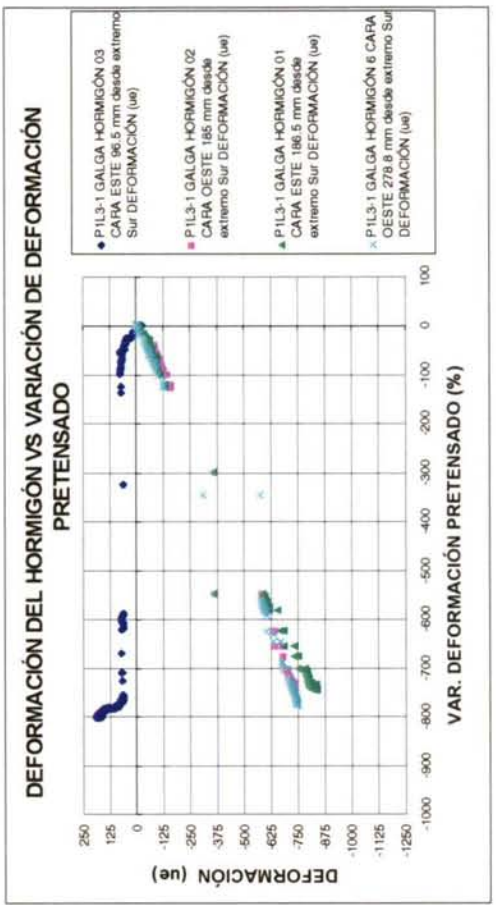
Gráfica 8.2.4-9



Gráfica 8.2.4-10



Gráfica 8.2.4-11



Gráfica 8.2.4-12



### 8.2.5. Prisma P2L3-1

Durante la transferencia no se detectó la rotura de ningún alambre del cordón. El ordenador sufrió una avería momentánea durante la transferencia, como consecuencia de la cual no se registró una parte intermedia del proceso (Gráfica 8.2.5-9). El cordón, en una zona alejada de la cara Norte aproximadamente 50 cm, se puso al rojo cereza al final del proceso. Se detectó el ruido producido al reptar el prisma, un crujido continuo. La viga se desplazó hacia el Sur aproximadamente 10 mm.

En la Gráfica 8.2.5-2 se aprecia que las deformaciones a lo largo del prisma son constantes hasta el 35% de la fuerza de pretensado transferida. A partir de entonces (Gráfica 8.2.4-11) se marcan las diferencias de deformación entre la zona central y los extremos de la viga. Las tres galgas de hormigón centrales pertenecen claramente a la zona de adherencia perfecta.

Tras la transferencia se aprecia que aumenta mucho más la deformación de las galgas de hormigón centrales que la de las laterales. Aparentemente se produce pérdida de adherencia en ambos extremos, debido a la fisuración de las zonas de transmisión. Este hecho se confirma en las Gráficas 8.2.5-3 y 8.2.5-4, en las que se aprecia una disminución del pretensado aparente y, consecuentemente, un aumento considerable de las pérdidas de pretensado en las galgas de cable laterales.

Las pérdidas de pretensado pasan a ser de 10-15% de la fuerza de tesado inicial, tras la transferencia, a un 30-35% en la zona central, a los cinco meses (Gráfica 8.2.5-6). Estas pérdidas son muy elevadas, y se presentan en cuatro de las cinco galgas extensométricas. Hasta los 130 días de la transferencia (Gráficas 8.2.5-5 y 8.2.5-6) aparentemente el funcionamiento de las galgas es correcto.

Como se puede apreciar en la Gráfica 8.2.5-8, la linealidad de la ley { $\%$  fuerza de pretensado transferida} respecto a la {penetración del pretensado} es considerable, representando ambas variables en escala logarítmica. Esto indica que la correlación de la Gráfica 8.2.5-7 es óptima con una curva potencial.

En las Gráficas 8.2.5-9 y 8.2.5-10 se aprecia una discontinuidad en las curvas, debido al fallo del PC durante la transferencia.

La deformación registrada por las galgas de hormigón (Gráfica 8.2.5-11), es considerablemente lineal respecto al porcentaje de fuerza de pretensado transferido en las galgas centrales (GH1, GH2, GH3 y GH6). En las galgas laterales se aprecia una pérdida de linealidad, debido a la pérdida de adherencia del cordón en esa zona. En esta gráfica se aprecia la gran simetría de la deformación de las galgas de hormigón, respecto al centro del prisma.

En las Tablas 8.2.5-1 a 8.2.5-3 se presenta un resumen de los resultados obtenidos, relativos a pérdidas de pretensado teóricas y estimadas a partir de la instrumentación, deformaciones detectadas por las galgas de hormigón, y valores de penetración en los anclajes activo y pasivo.

Tabla 8.2.5-1

Prisma:	P2L3-1	Fecha tesado	Fecha transferencia	Célula de carga CC64	Célula de carga CC65	Célula de carga CC64	Célula de carga CC65	Galga cable 04	Galga cable 02	Galga cable 01	Galga cable 03
		09/02/99	12/02/99	Sur	Norte	Sur	Norte	100	145	190	235
		Tiempo transcurrido desde tesado	Tiempo transcurrido desde transferencia	Anclaje pasivo	Anclaje activo	Anclaje pasivo	Anclaje activo	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur
	Fecha	Días	Segundos	(kN)	(kN)	% pérdidas	% pérdidas	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente
Pretensado antes transferencia	12/02/99	2.80	0	187.3	189.9	12.0	12.4	188.6	188.6	188.6	188.6
Pretensado tras transferencia	12/02/99	2.94	12016	-2.7	0.4			162.4	172.6	172.3	172.2
% Pérdidas instantáneas reales								13.9	8.5	8.7	8.7
% Instantáneas teóricas								11.1	11.1	11.1	11.1
%Pérdidas reales / %pérdidas teóricas tras transferencia								1.2	0.8	0.8	0.8
Zona: TR/central								TR	Central	Central	Central

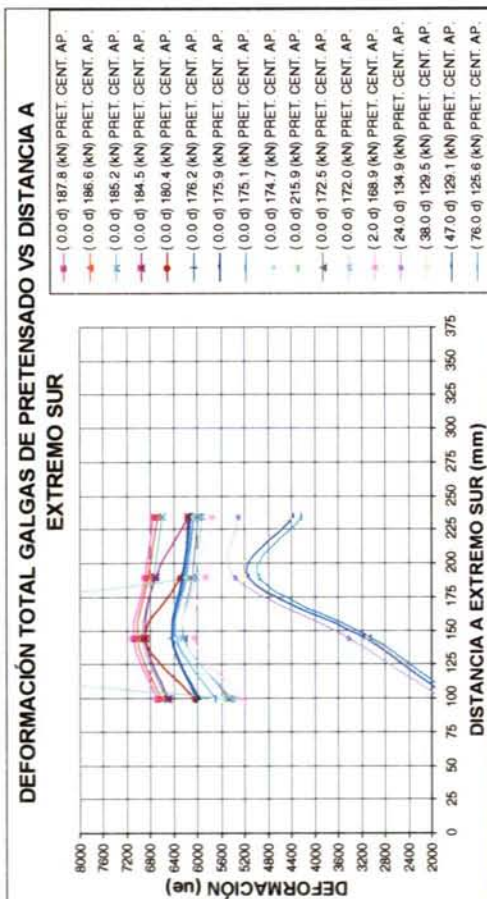
Tabla 8.2.5-2

Prisma:		P2L3-1									
Galga hormigón		05	04	03	01	02	6	07	08		
Cara		Este	Este	Este	Este	Oeste	Oeste	Oeste	Oeste		
Distancia a extremo sur (mm)		29.4	60.3	95.8	190	190.6	285.7	310.7	344.9		
Def. real antes transferencia (ue)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
Def. real tras transferencia (ue)		-239.4	-536.3	-895.3	-891.8	-846.1	-827.6	-499.9	-269.9		
Def. teórica tras transferencia (ue)		-746.2	-746.2	-746.2	-746.2	-746.2	-746.2	-746.2	-746.2		
Def. real /def. teórica tras transferencia		0.3	0.7	1.2	1.2	1.1	1.1	0.7	0.4		
Zona: TR/central		TR	TR	Central	Central	Central	Central	TR	TR		

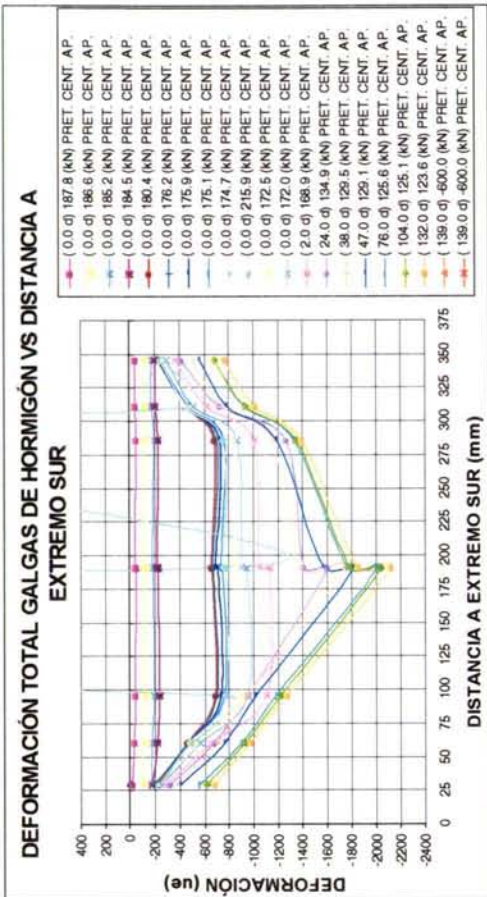
Tabla 8.2.5-3

P2L3-1	Anclaje activo	Anclaje pasivo
Deslizamiento máximo	3.3	3.2
Deslizamiento mínimo	3.2	3.0

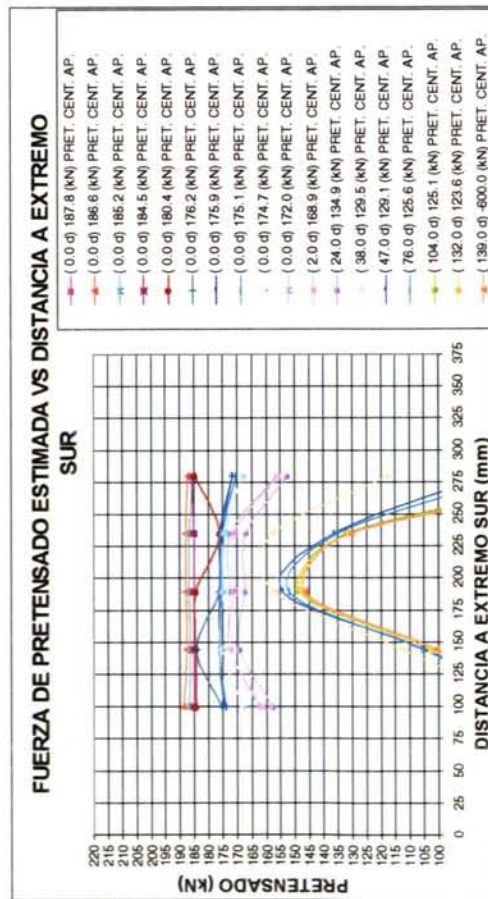




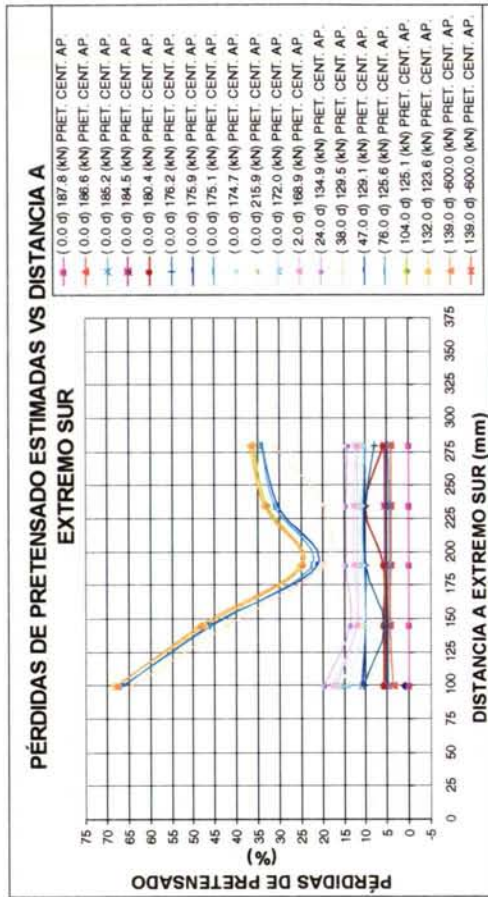
Gráfica 8.2.5-1



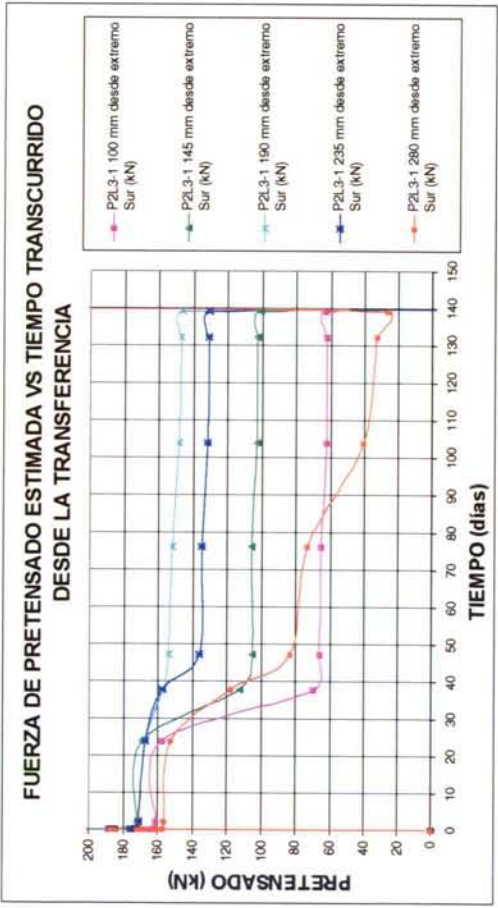
Gráfica 8.2.5-2



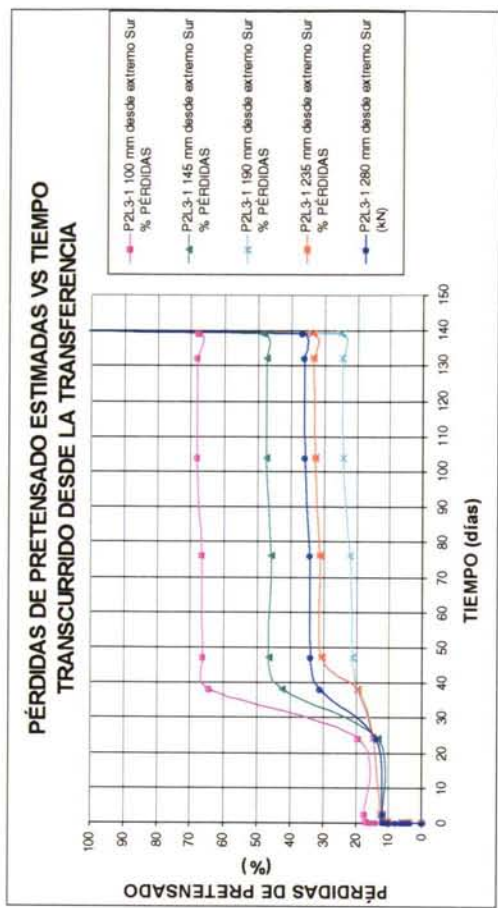
Gráfica 8.2.5-3



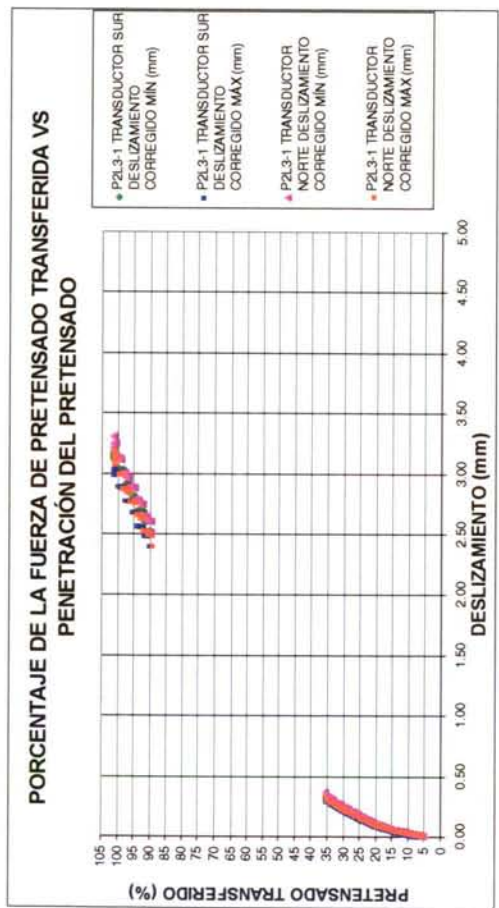
Gráfica 8.2.5-4



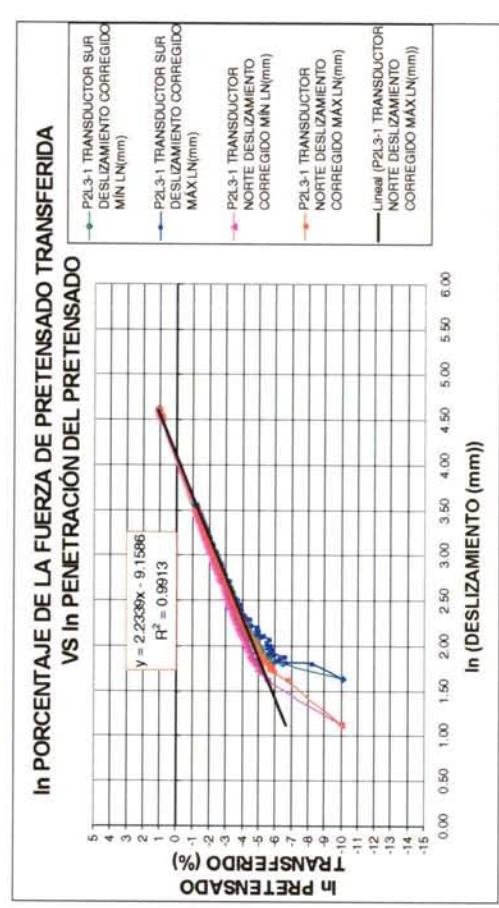
Gráfica 8.2.5-5



Gráfica 8.2.5-6

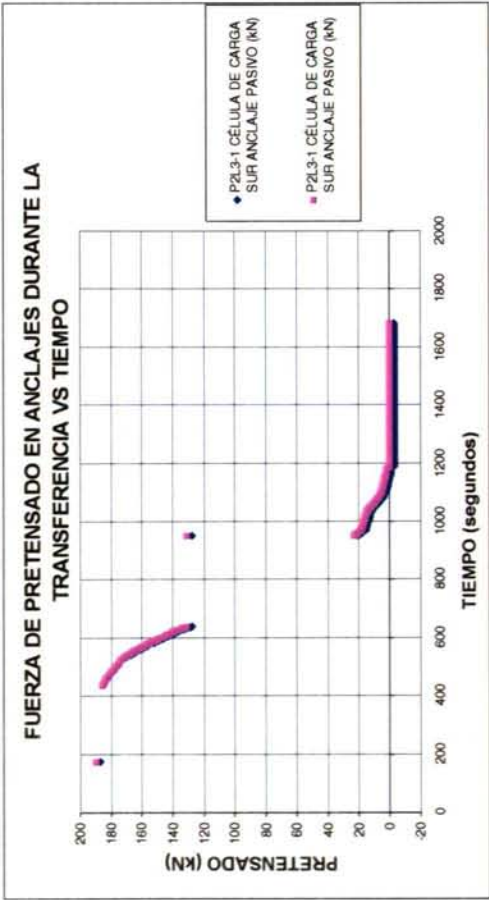


Gráfica 8.2.5-7

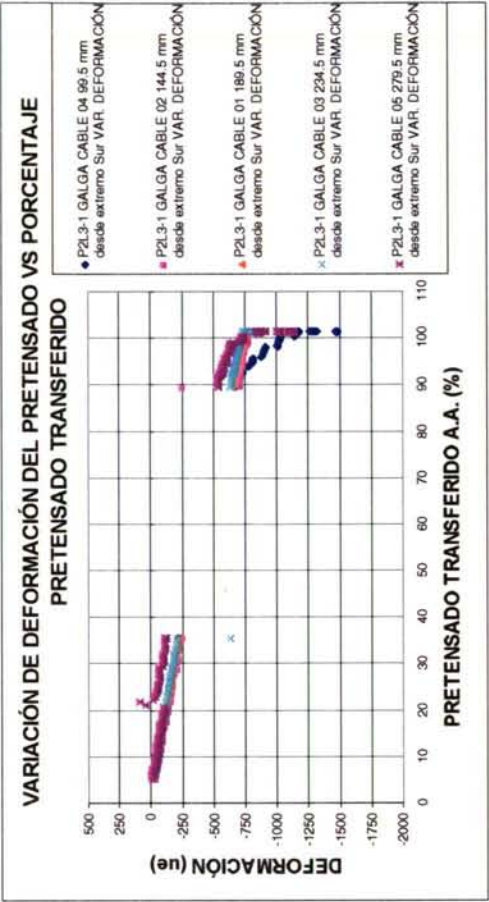


Gráfica 8.2.5-8

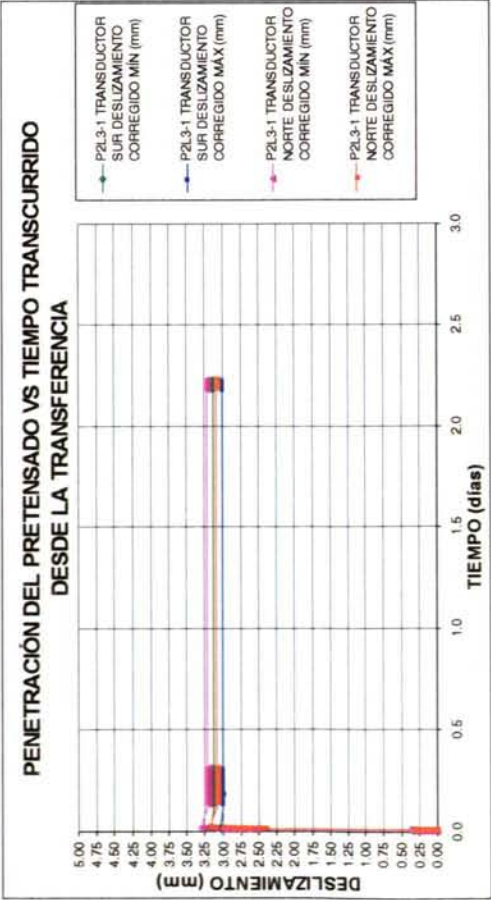




Gráfica 8.2.5-9



Gráfica 8.2.5-10



Gráfica 8.2.5-11

### 8.2.6. Prisma P3L3-1

Se aprecia un comportamiento muy estable de la instrumentación durante el período de medida (Gráficas 8.2.6-1 a 8.2.6-15). Todas las galgas de cable funcionaron correctamente durante el tesado, fabricación, transferencia y período posterior a la misma (Gráfica 8.2.6-1). Esto es debido probablemente al perfeccionamiento de los procedimientos de instrumentación con la práctica.

En las Gráficas 8.2.6-2 y 8.2.6-11 se aprecia que hasta el 40% de la fuerza de pretensado transferida se mantiene constante la deformación del hormigón a lo largo del prisma. A medida que aumenta la carga transferida se aprecia la incurvación de las leyes de deformación longitudinales.

Las pérdidas de pretensado previas a la transferencia son del 3% aproximadamente, aumentando hasta el 11-15% tras la transferencia. Al cabo de diez días de la transferencia las pérdidas están comprendidas entre el 17-19% de la fuerza de pretensado inicial (Gráfica 8.2.6-6). Se aprecia un comportamiento anómalo de la instrumentación entre los tres y los cuatro días posteriores a la transferencia, probablemente debido a una conexión incorrecta.

Se observa una gran estabilidad de la fuerza de pretensado estimada, en todas las galgas de cable (Gráfica 8.2.6-3), lo que indica que la transferencia se ha producido dentro de la zona instrumentada (longitudes de transmisión menores que 0.98 m en extremo Sur y que 0.97 m en el extremo Norte).

Se aprecia adherencia perfecta de las galgas de cable, comparando la variación de deformación con la que experimentan las galgas de hormigón situadas en la misma sección (Gráfica 8.2.6-14).

En la Gráfica 8.2.6-15 se aprecia la variación de deformación de las galgas de hormigón, tras la transferencia, respecto al tiempo en escala logarítmica. Se aprecia una considerable linealidad en todas las curvas resultantes, por lo que la variación de deformación es aproximadamente logarítmica respecto al tiempo (Gráfica 8.2.6-12).

La transferencia tuvo lugar de forma gradual (Gráfica 8.2.6-9), con una duración de aproximadamente siete minutos.

En las Tablas 8.2.6-1 a 8.2.6-3 se presenta un resumen de los resultados obtenidos, relativos a pérdidas de pretensado teóricas y estimadas a partir de la instrumentación, deformaciones detectadas por las galgas de hormigón, y valores de penetración en los anclajes activo y pasivo.



Tabla 8.2.6-1

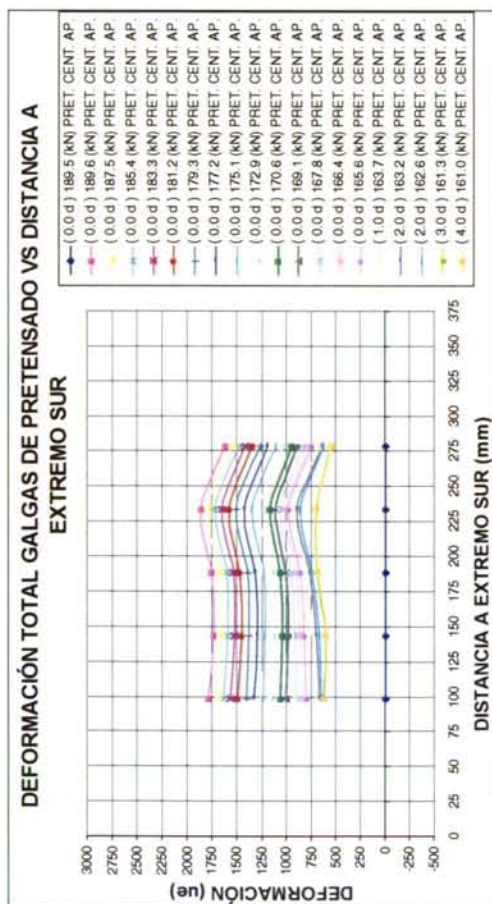
Prisma:	P3L3-1	Fecha tesado:	Fecha transferencia:	Célula de carga CC64	Célula de carga CC65	Célula de carga CC64	Célula de carga CC65	Galga cable 01	Galga cable 02	Galga cable 03	Galga cable 04	Galga cable 05
		02/03/1999	05/03/99	Sur	Norte	Sur	Norte	188	143	233	98	278
		Tiempo transcurrido desde tesado	Tiempo transcurrido desde transferencia	Anclaje pasivo	Anclaje activo	Anclaje pasivo	Anclaje activo	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur
	Fecha	Días	Segundos	(kN)	(kN)	(kN)	% pérdidas	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente
Pretensado antes transferencia	05/03/99	2.81	0	188.4	190.6	188.4	3.5	189.5	189.5	189.5	189.5	189.5
Pretensado tras transferencias reales	05/03/99	2.83	1830	0.0	2.7	0.0		167.6	172.1	169.1	169.5	170.4
% Pérdidas instantáneas reales								11.6	9.2	10.7	10.6	10.1
% Instantáneas teóricas								10.9	10.9	10.9	10.9	10.9
% Pérdidas reales / %pérdidas teóricas tras transferencia								1.1	0.8	1.0	1.0	0.9
Zona: TR/central								TR	Central	Central	Central	Central

Tabla 8.2.6-2

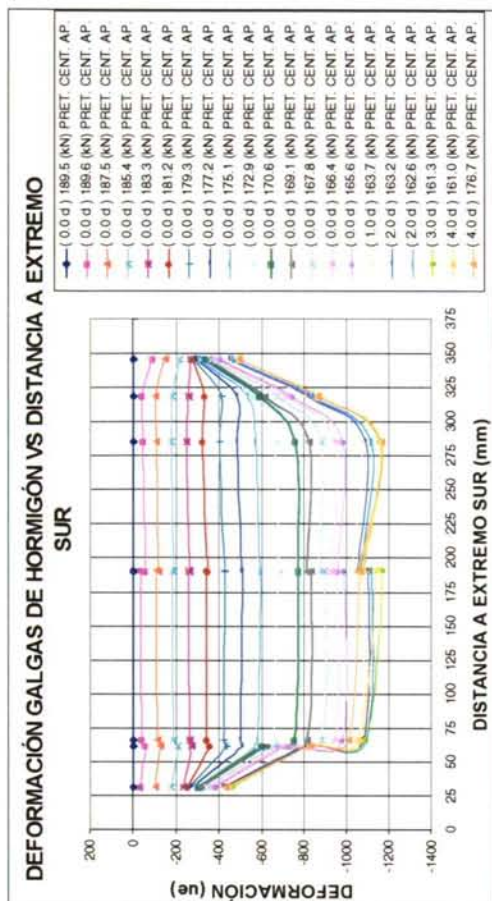
P3L3-1											
Prisma:						P3L3-1					
Galga hormigón	05	04	03	01	02	6	07	08			
Cara	Este	Este	Este	Este	Oeste	Oeste	Oeste	Oeste			
Distancia al extremo sur (cm)	31	61.5	66	190.8	189.5	285.3	318.3	345.8			
Def. real antes transferencia (ue)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
Def. real tras transferencia (ue)	-304.0	-598.6	-748.8	-769.9	-768.8	-755.9	-589.2	-333.3			
Def. teórica tras transferencia (ue)	-734.3	-734.3	-734.3	-734.3	-734.3	-734.3	-734.3	-734.3			
Def. real /def. teórica tras transferencia	0.4	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	0.5			
Zona: TR/central	TR	TR	Central	Central	Central	Central	TR	TR			

Tabla 8.2.6-3

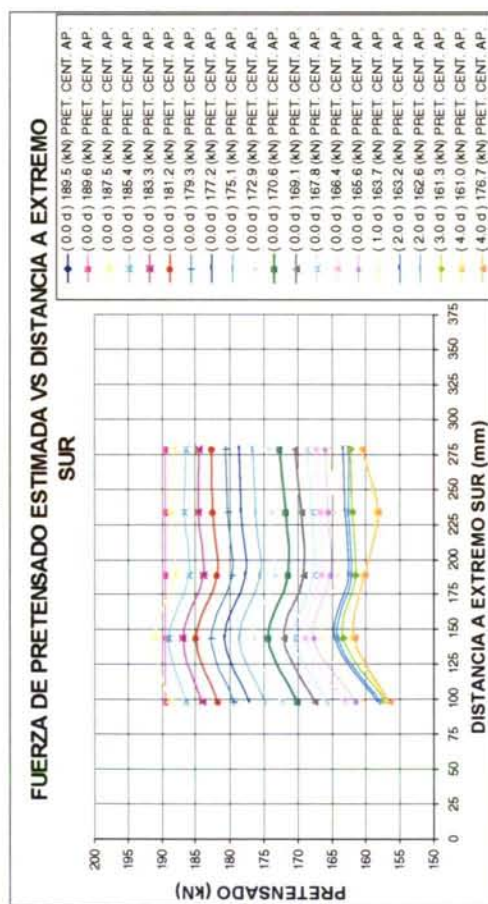
P3L3-1		
Anclaje activo		Anclaje pasivo
Deslizamiento máximo (mm)	2.43	2.61
Deslizamiento mínimo (mm)	2.29	2.47



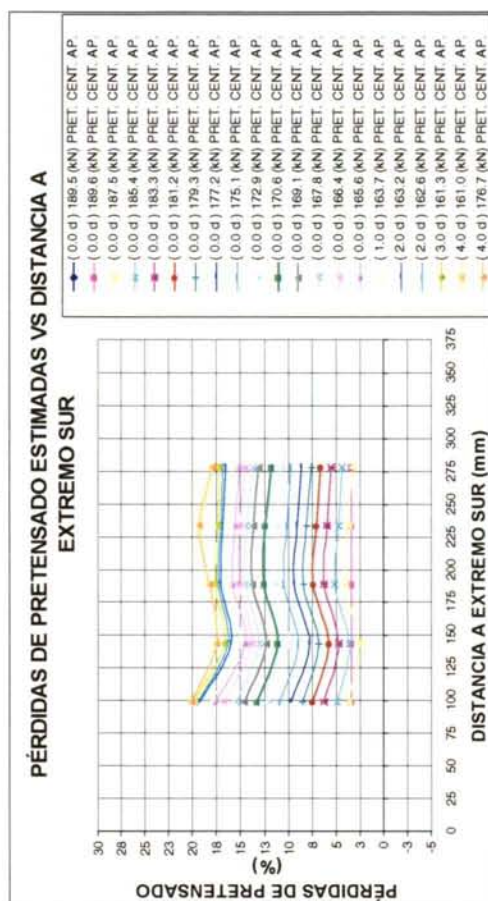
Gráfica 8.2.6-1



Gráfica 8.2.6-2

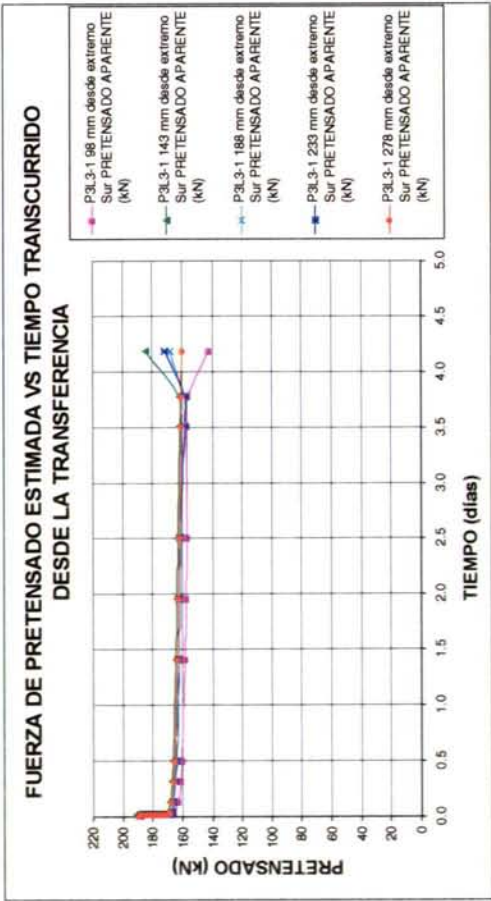


Gráfica 8.2.6-3

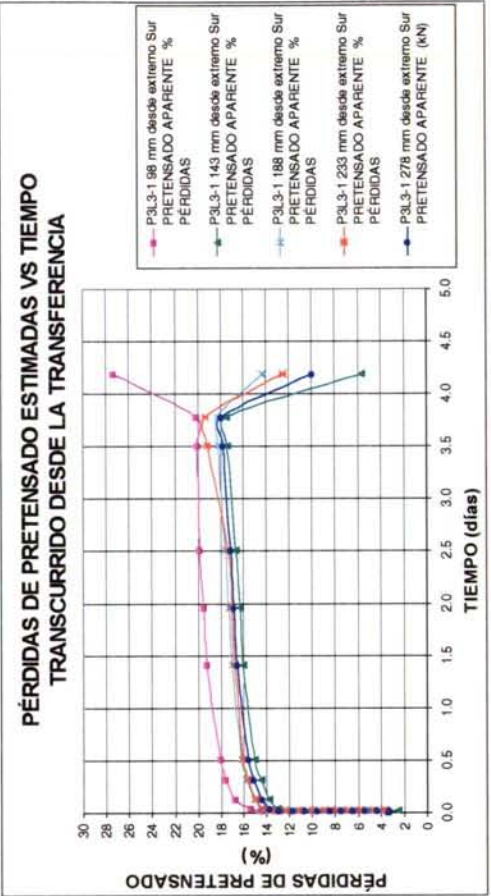


Gráfica 8.2.6-4

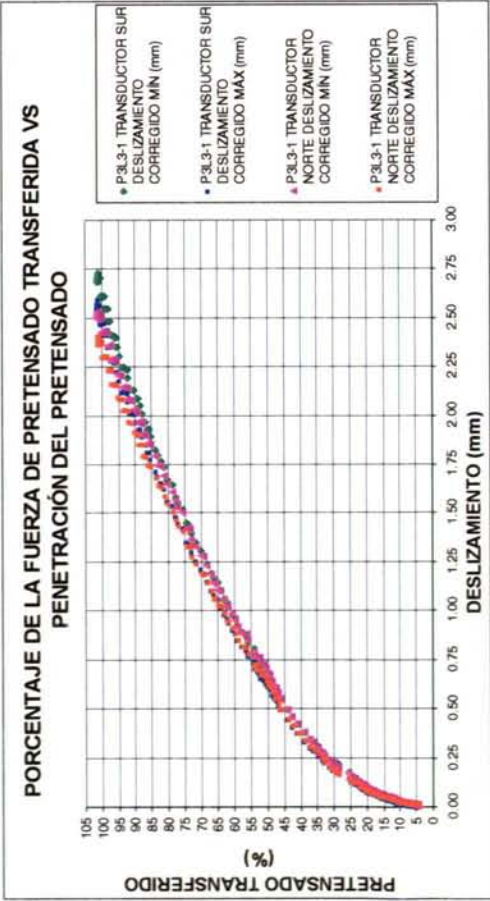




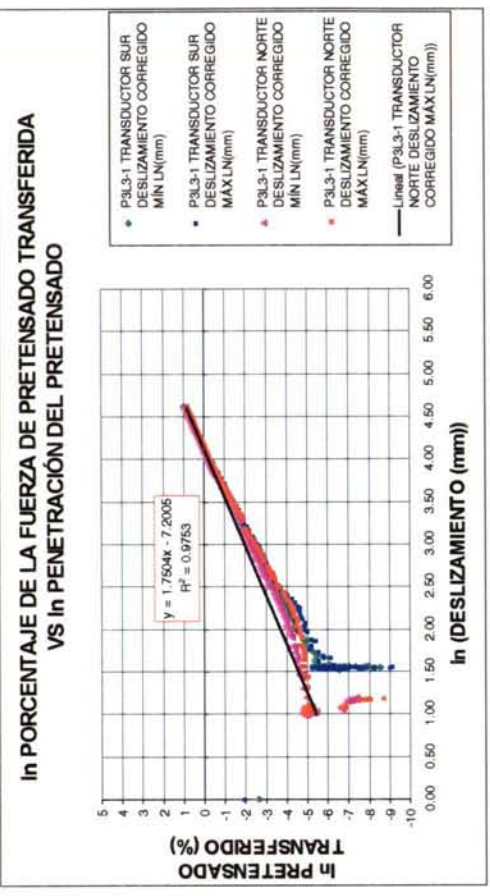
Gráfica 8.2.6-5



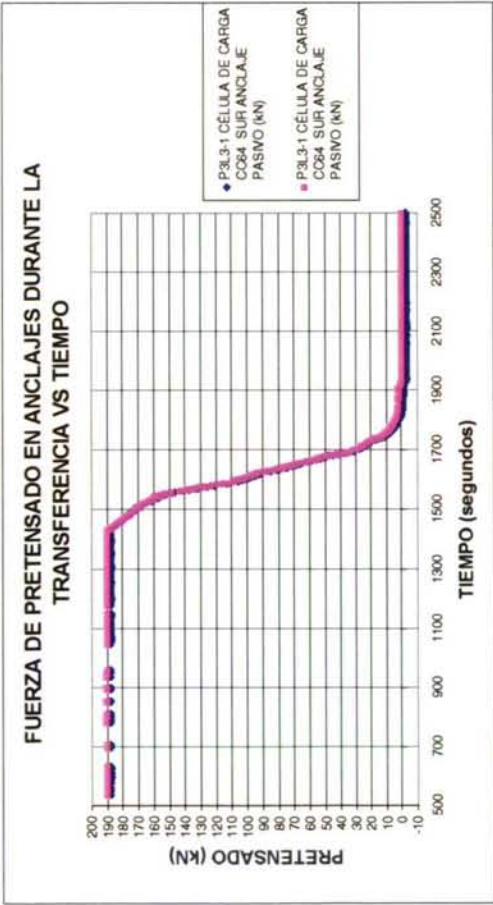
Gráfica 8.2.6-6



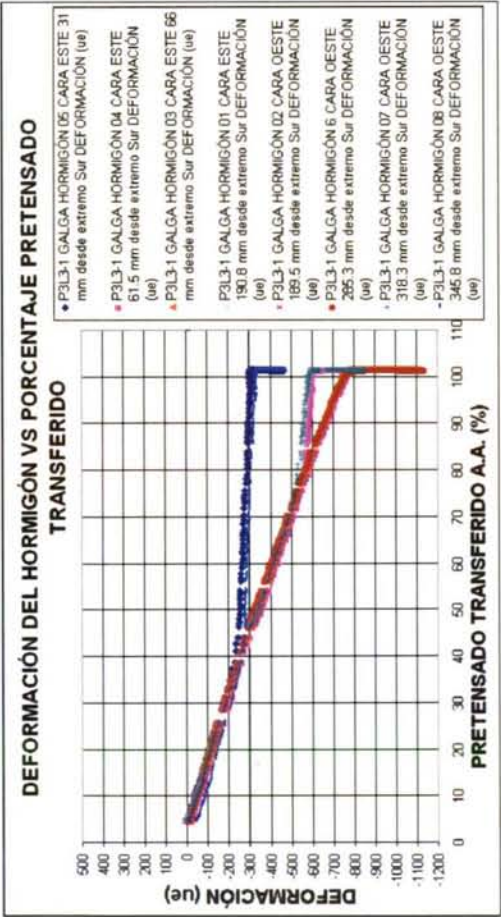
Gráfica 8.2.6-7



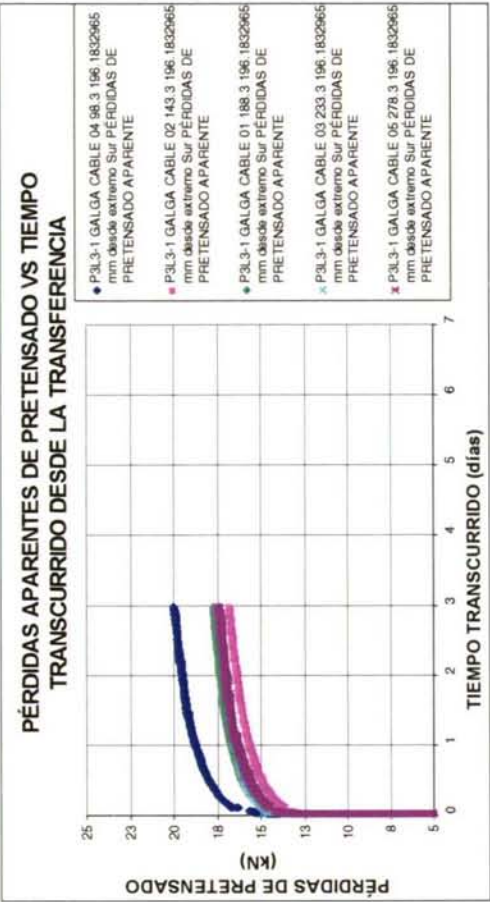
Gráfica 8.2.6-8



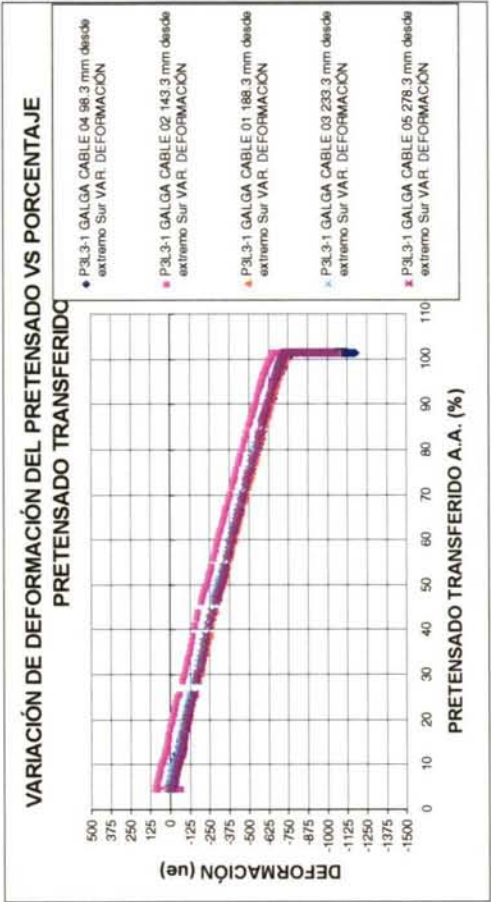
Gráfica 8.2.6-9



Gráfica 8.2.6-11

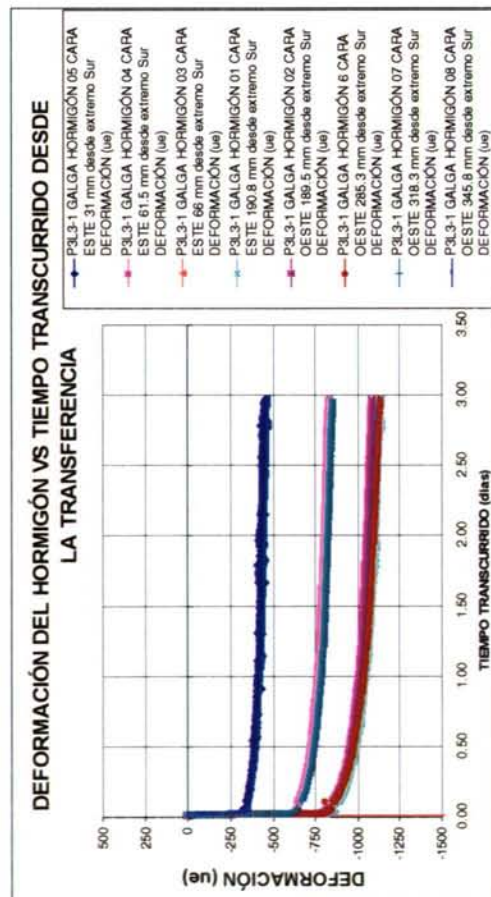


Gráfica 8.2.6-10

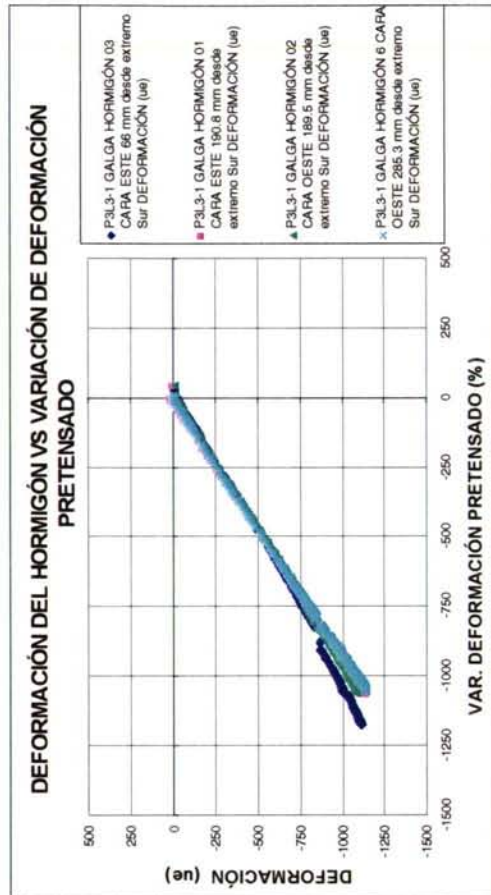


Gráfica 8.2.6-12

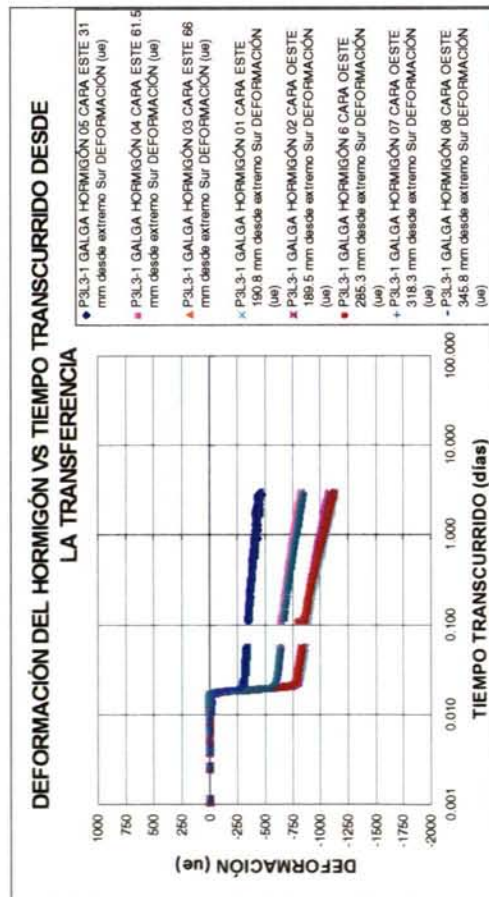




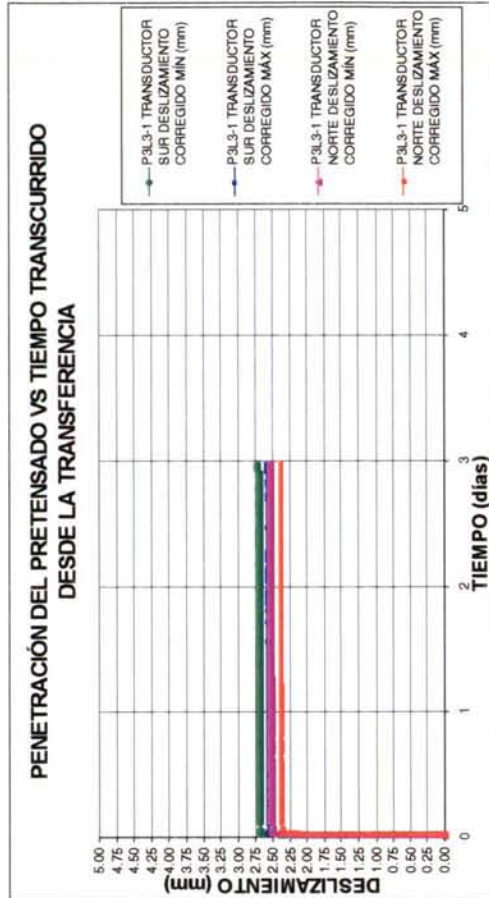
Gráfica 8.2.6-13



Gráfica 8.2.6-14



Gráfica 8.2.6-15



### 8.2.7. Prisma P3C

La transferencia fue gradual, de 20 minutos de duración aproximada (Gráfica 8.2.7-9). Durante la misma no se detectó rotura alguna de ningún alambre del cordón. La viga se desplazó hacia el lado pasivo aproximadamente 10 mm.

Se observa un comportamiento estable de la instrumentación durante el tesado, transferencia y período posterior a la misma (Gráficas 8.2.7-1 a 8.2.7-13).

En las Gráficas 8.2.7-2 y 8.2.7-11 se observa la deformación constante del hormigón en la zona instrumentada, hasta que el 40% de la fuerza de pretensado ha sido transferida. A partir de entonces las galgas extremas no experimentan aumento de deformación, al agotar su capacidad adherente el cordón en esa sección, y las galgas de la zona central aumentan su deformación conformando un escalón horizontal claro, que delimita la zona central de adherencia perfecta.

Respecto a las galgas de pretensado, todas experimentan durante todo el proceso unas pérdidas uniformes, lo que indica que están en la zona central. Esto que permite acotar superiormente la longitud de transmisión de ambos extremos en 0.9 m (Gráfica 8.2.7-3).

Las pérdidas antes de la transferencia son despreciables. Las pérdidas instantáneas de pretensado son de 7/8% de la fuerza de pretensado inicial. Las pérdidas al cabo de mes y medio son del 19/20% de media (Gráfica 8.2.7-4), inferiores a las que presentan los prismas de hormigón ligero (Apartados 8.2.1 a 8.2.6).

En la Gráfica 8.2.7-7 se presenta el porcentaje de la fuerza de pretensado transferida respecto a la penetración del pretensado. Si representamos la misma curva en ejes logarítmicos la curva resultante presenta una linealidad elevada en este material (Gráfica 8.2.7-8).

La variación de deformación del pretensado durante la transferencia, respecto al porcentaje de fuerza transferida es muy lineal en todas las galgas de cable (Gráfica 8.2.7-10). Lo mismo le sucede a las galgas de hormigón de la zona central, galgas GH1, GH2, GH3 y GH6 (Gráfica 8.2.7-11).

Por lo que respecta al aumento de la penetración durante el tiempo, no se detecta variación alguna de penetración del pretensado durante los cuatro días siguientes a la transferencia (Gráfica 8.2.7-12).

En la Gráfica 8.2.7-13 se presenta el comportamiento deformacional de las galgas de hormigón durante los días posteriores a la transferencia. Se observa el aumento de la deformación de compresión, debido a los efectos diferidos.

En general, se aprecia una estabilidad de la fuerza de pretensado estimada a lo largo del tiempo, superior que la de los prismas de hormigón ligero estudiados anteriormente (Gráficas 8.2.7-5 y 8.2.7-6).

En las Tablas 8.2.7-1 a 8.2.7-3 se presenta un resumen de los resultados obtenidos, relativos a pérdidas de pretensado teóricas y estimadas a partir de la instrumentación, deformaciones detectadas por las galgas de hormigón, y valores de penetración en los anclajes activo y pasivo.



Tabla 8.2.7-1

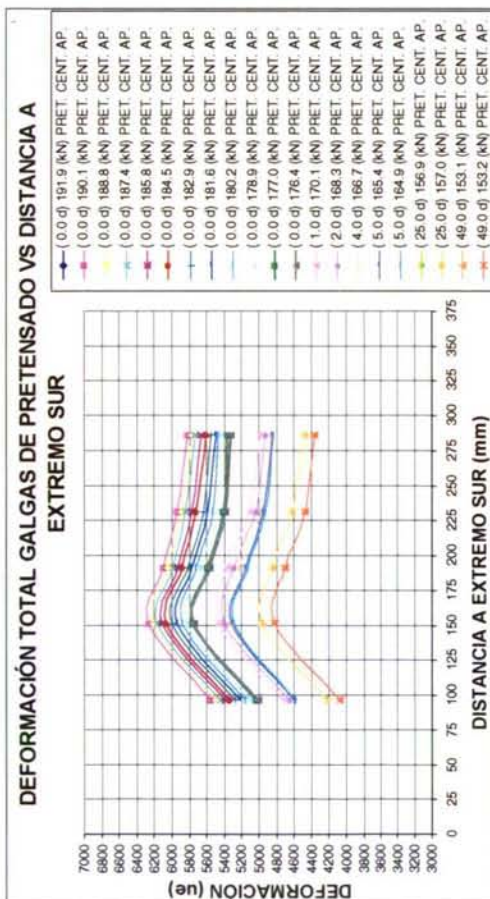
Prisma:	P3C	Fecha tesado:	Fecha transferencia:	Célula de carga CC64	Célula de carga CC65	Célula de carga CC64	Célula de carga CC65	Galga cable 04	Galga cable 02	Galga cable 01	Galga cable 03	Galga cable 05
		01/02/99	04/02/99	Sur	Norte	Sur	Norte	96	151	191	231	286
		Tiempo transcurrido desde tesado	Tiempo transcurrido desde transferencia	Anclaje pasivo	Anclaje activo	Anclaje pasivo	Anclaje activo	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur
	Fecha	Días	Segundos	(kN)	(kN)	% pérdidas	% pérdidas	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente
Pretensado antes transferencia	04/02/99	2.74	0	190.9	192.8	10.1	10.6	191.9	191.9	191.9	191.9	-204.2
Pretensado tras transferencia	04/02/99	2.76	1910	-0.5	2.2			177.0	177.5	176.3	175.6	-188.8
%Pérdidas instantáneas reales								7.7	7.5	8.1	8.5	7.6
%Instantáneas teóricas								7.7	7.7	7.7	7.7	7.7
%Pérdidas reales / %pérdidas teóricas tras transferencia								1.0	1.0	1.1	1.1	1.0
Zona: TR/central								Central	Central	Central	Central	Central

Tabla 8.2.7-2

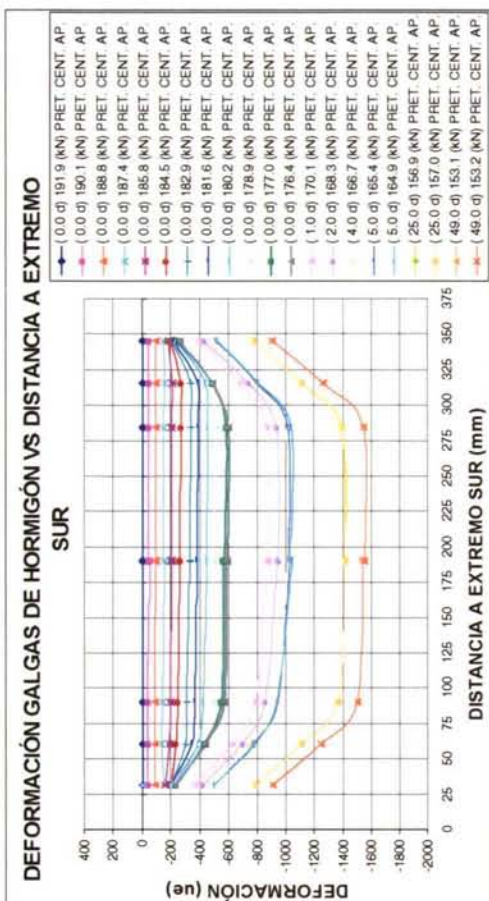
Prisma:		P3C							
Galga hormigón		05	04	03	01	02	6	07	08
Cara		Este	Este	Este	Este	Oeste	Oeste	Oeste	Oeste
Distancia desde el extremo sur (cm)		31.2	60.1	90.3	190.5	189.5	284.3	315.5	345.3
Def. real antes transferencia (ue)		0	0	0	0	0	0	0	0
Def. real tras transferencia (ue)		-228	-431	-556	-562	-576	-588	-491	-261
Def. teórica tras transferencia (ue)		-523	-523	-523	-523	-523	-523	-523	-523
Def. real /def. teórica tras transferencia		0.4	0.8	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.5
Zona: TR/central		TR	TR	Central	Central	Central	Central	TR	TR

Tabla 8.2.7-3

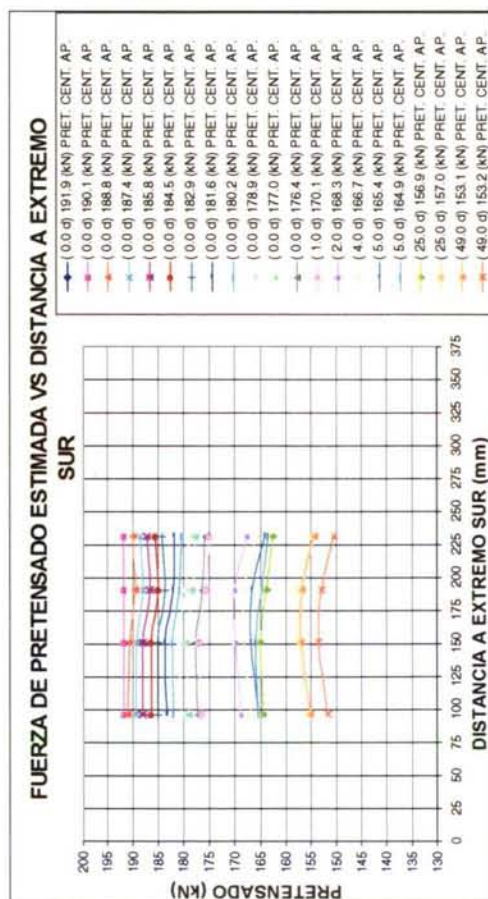
P3C		Anclaje activo	Anclaje pasivo
Deslizamiento máximo (mm)		2.56	2.49
Deslizamiento mínimo (mm)		2.42	2.36



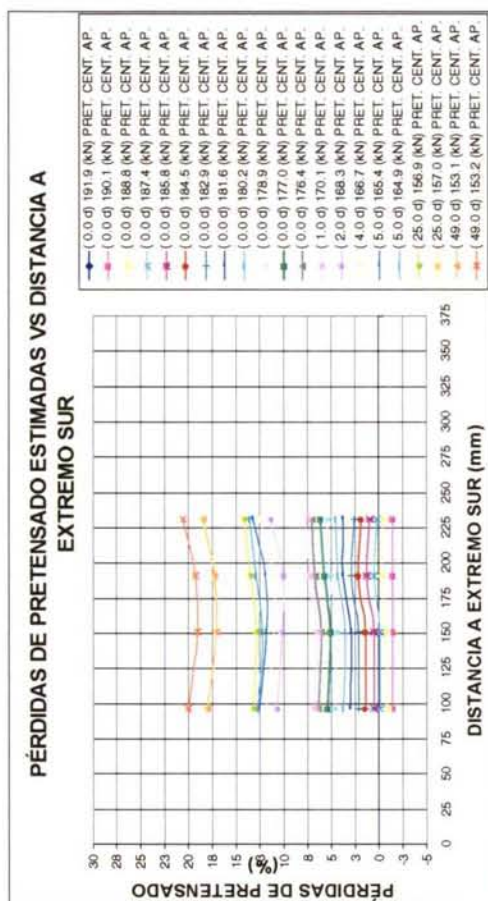
Gráfica 8.2.7-1



Gráfica 8.2.7-2

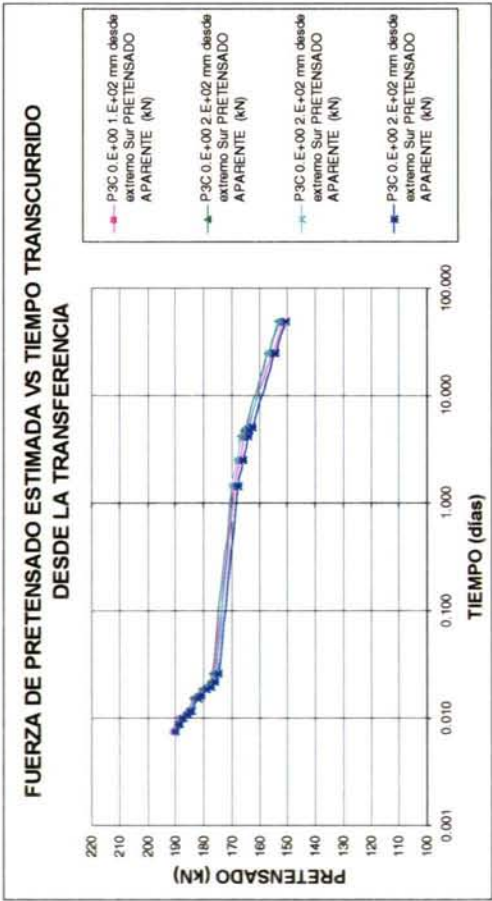


Gráfica 8.2.7-3

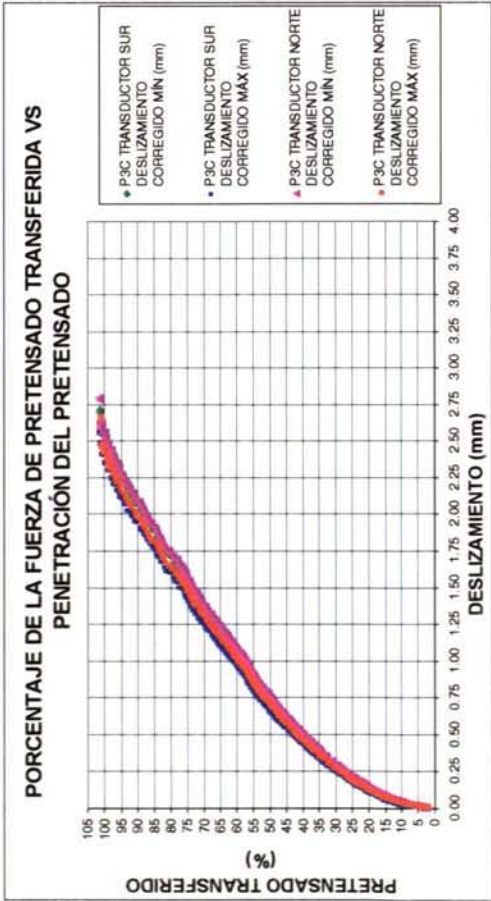


Gráfica 8.2.7-4

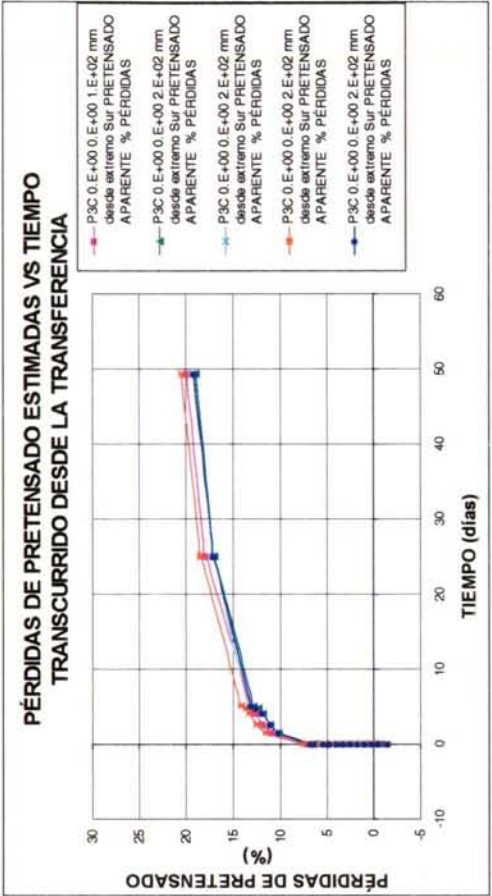




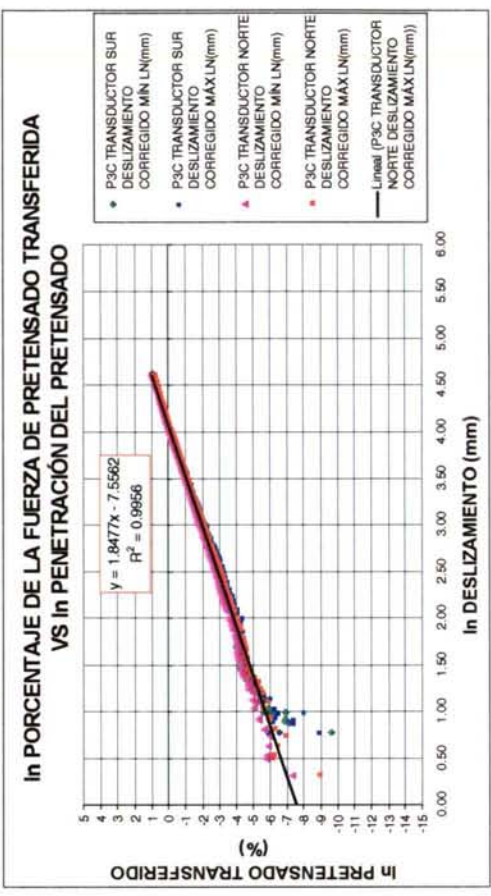
Gráfica 8.2.7-5



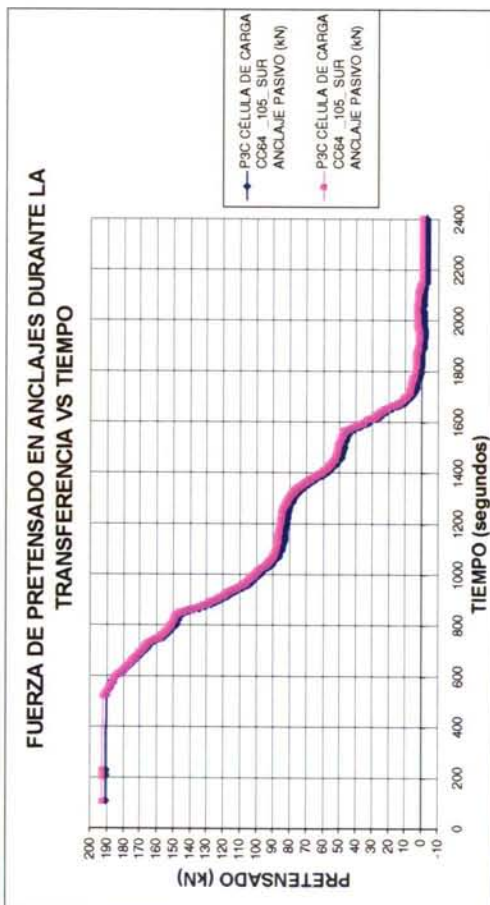
Gráfica 8.2.7-7



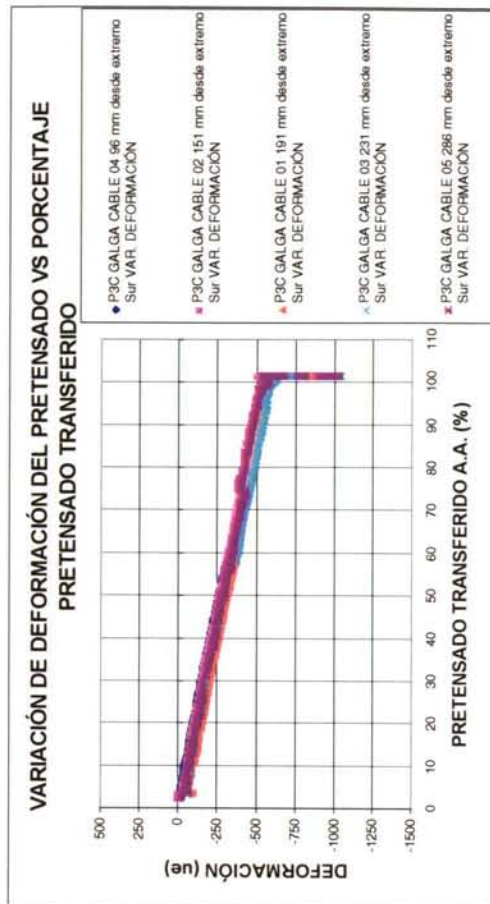
Gráfica 8.2.7-6



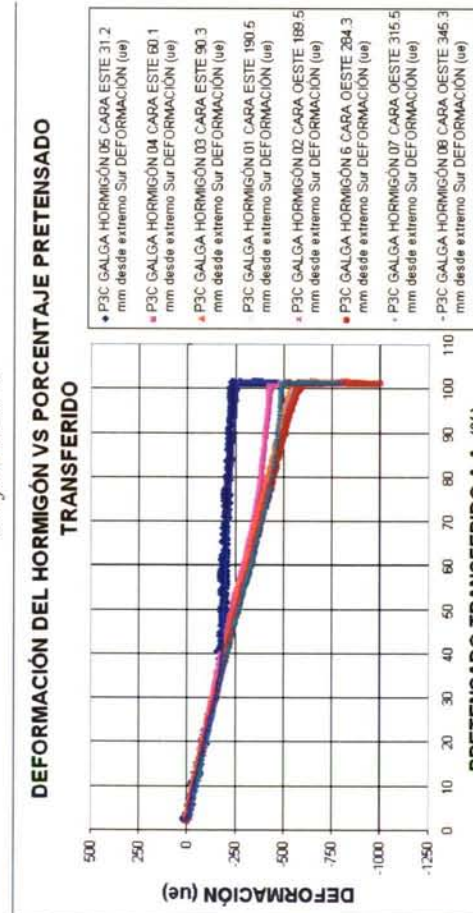
Gráfica 8.2.7-8



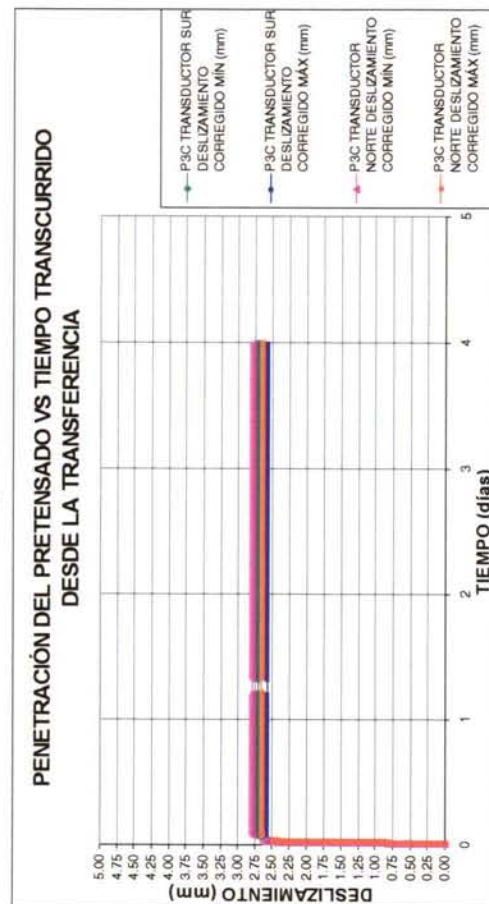
Gráfica 8.2.7-9



Gráfica 8.2.7-10

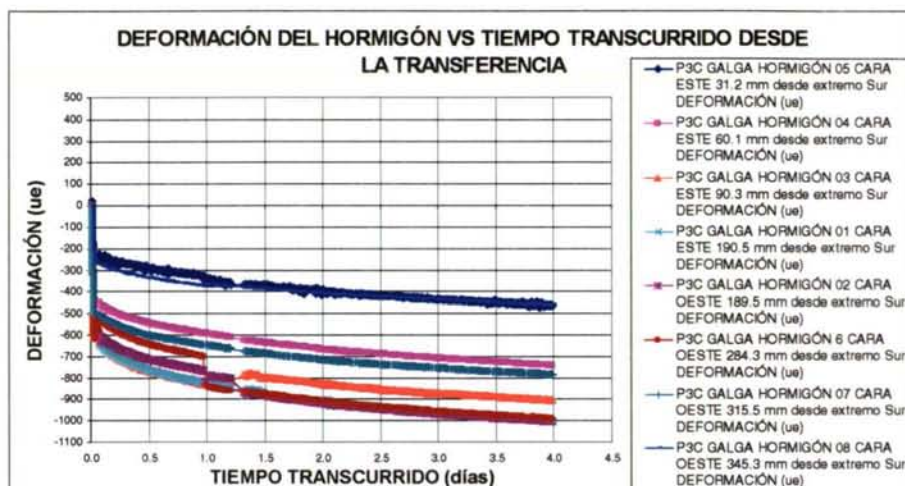


Gráfica 8.2.7-11



Gráfica 8.2.7-12





Gráfica 8.2.7-13

### 8.2.8. Prisma P4C

La transferencia duró aproximadamente diez minutos, sin que se registrase rotura de ningún alambre durante la misma (Gráfica 8.2.8-9).

Todas las bandas extensométricas funcionaron correctamente durante el tesado, hormigonado, transferencia y después de la misma (Gráficas 8.2.8-1 y 8.2.8-2).

En las Gráficas 8.2.8-2 y 8.2.8-11 se aprecia que hasta el 40% de la fuerza de pretensado transferida, se mantiene una ley de deformación del hormigón constante a lo largo del prisma, en la zona instrumentada. A partir de entonces se aprecia el aumento de curvatura en los extremos de la curva de deformación longitudinal (Gráfica 8.2.8-2), delimitándose las zonas de transmisión de los extremos, y la zona central. La gráfica presenta una simetría considerable respecto al centro del prisma. No se aprecia un escalón horizontal claro en la zona central, lo que puede ser debido a que la longitud de transmisión sea superior a 0.90 metros.

Las pérdidas instantáneas de pretensado son del 9/10% de la fuerza de pretensado inicial, al cabo de varios meses alcanzan el 25% en el interior, y el 30% en el extremo Sur (Gráfica 8.2.8-6). Este prisma presenta pérdidas instantáneas y diferidas superiores a las del prisma P3C (Apartado 8.2.7). La fuerza de pretensado estimada se estabiliza al cabo de dos meses, presentando un comportamiento constante hasta la última medida, a los cuatro meses aproximadamente (Gráfica 8.2.8-5).

Por lo que respecta a la {penetración del cordón} respecto al {porcentaje de pretensado transferido} (Gráfica 8.2.8-7), se aprecia un comportamiento claramente lineal en la Gráfica 8.2.8-8, en escala doblemente logarítmica, al igual que sucedía en el resto de los prismas.

Se aprecia una variación lineal de la deformación del pretensado en las galgas instrumentadas, respecto al porcentaje de pretensado transferido, durante todo el proceso de transferencia (Gráfica 8.2.8-10). Esta linealidad también se aprecia en las galgas centrales de hormigón (galgas GH1, GH2, GH3 y GH6, Gráfica 8.2.8-11).

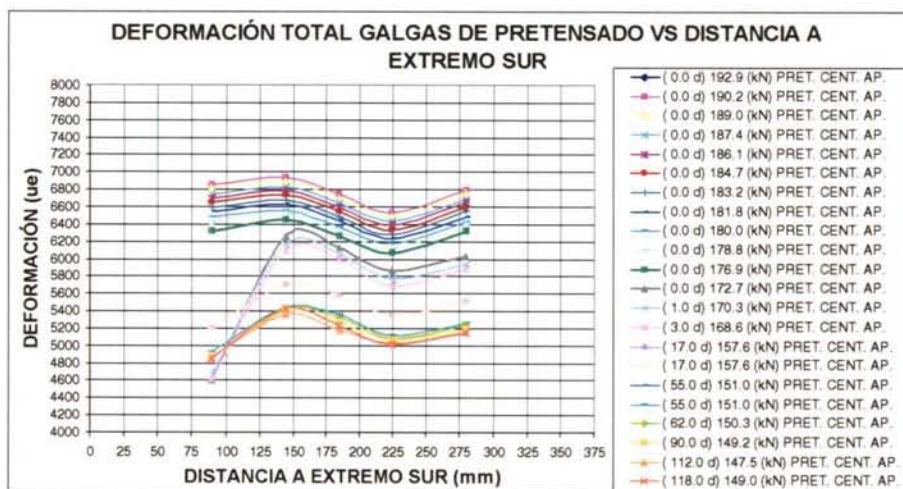
En la Gráfica 8.2.8-12 se observa el comportamiento adherente en la zona instrumentada, comparando la deformación de las galgas de hormigón respecto a la variación de deformación de las galgas de pretensado situadas a la misma altura en el

prisma. Se observa que las galgas GH1 y GH6 presentan una buena adherencia, manifestada por la igualdad de valores de deformación del hormigón y del pretensado.

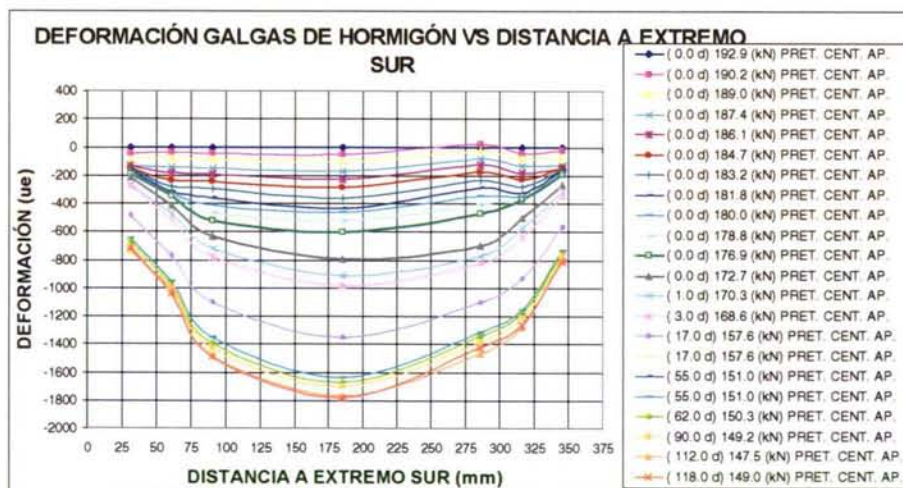
La penetración del pretensado aumenta ligeramente entre los 3 y los 4 días posteriores a la transferencia (Gráfica 8.2.8-13), lo que estará motivado por pérdida de adherencia. Sin embargo, no se apreció fisuración en ninguno de los prismas de hormigón convencional de la dosificación estudiada.

Se aprecia un cierto aumento (de aproximadamente 0.25 mm) del deslizamiento relativo pretensado-hormigón con el tiempo (Gráfica 8.2.8-14), al cabo de 4 días del fin de la transferencia. Sin embargo, no se observó fisuración longitudinal ni en este prisma ni el en el P3C.

En las Tablas 8.2.8-1 a 8.2.8-3 se presenta un resumen de los resultados obtenidos, relativos a pérdidas de pretensado teóricas y estimadas a partir de la instrumentación, deformaciones detectadas por las galgas de hormigón, y valores de penetración en los anclajes activo y pasivo.



Gráfica 8.2.8-1



Gráfica 8.2.8-2



Tabla 8.2.8-1

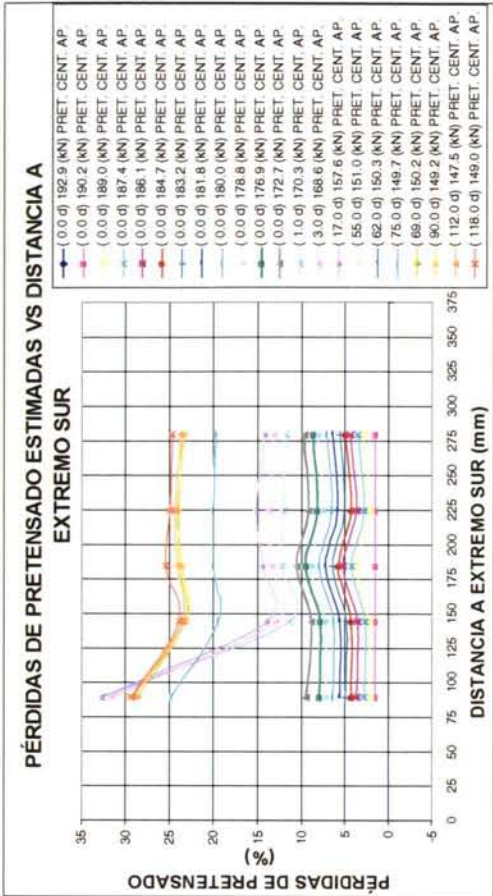
Prisma:	P4C	Fecha tesado:	Fecha transferencia:	Célula de carga CC64	Célula de carga CC65	Célula de carga CC64	Célula de carga CC65	Galga cable 04	Galga cable 02	Galga cable 01	Galga cable 03	Galga cable 05
		23/02/99	26/02/99	Sur	Norte	Sur	Norte	89	144	184	224	279
		Tiempo transcurrido desde tesado	Tiempo transcurrido desde transferencia	Anclaje pasivo	Anclaje activo	Anclaje pasivo	Anclaje activo	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur	mm desde extremo Sur
	Fecha	Días	Segundos	(kN)	(kN)	% pérdidas	% pérdidas	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente	Fuerza de pretensado aparente
Pretensado antes transferencia	26/02/99	2.81	0	192.7	193.0	8.9	9.6	192.9	192.9	192.9	192.9	192.9
Pretensado tras transferencia	26/02/99	2.84	2148	-1.1	0.8			176.7	178.3	175.1	177.5	176.2
%Pérdidas instantáneas reales								8.4	7.6	9.2	8.0	8.7
%Instantáneas teóricas								7.7	7.7	7.7	7.7	7.7
%Pérdidas reales / %pérdidas teóricas tras transferencia								1.1	1.0	1.2	1.0	1.1
Zona: TR/central								TR	Central	TR	TR	TR

Tabla 8.2.8-2

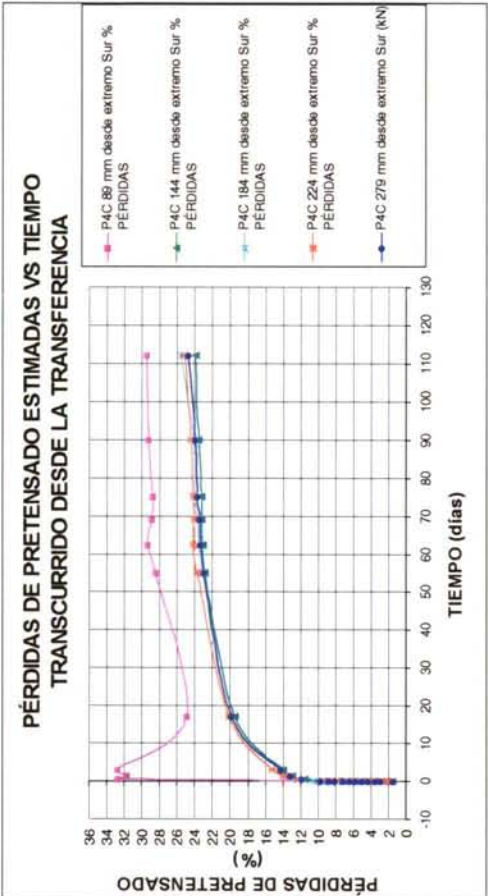
Prisma:		P4C							
Galga hormigón		05	04	03	01	02	6	07	08
Cara		Este	Este	Este	Este	Oeste	Oeste	Oeste	Oeste
Distancia desde el extremo sur (cm)		31.1	60.3	90.5	185	190.6	285.5	315.9	345.3
Def. real antes transferencia (ue)		0	0	0	0	0	0	0	0
Def. real tras transferencia (ue)		-188	-352	-530	-596	-671	-481	-380	-199
Def. teórica tras transferencia (ue)		-526	-526	-526	-526	-526	-526	-526	-526
Def. real /def. teórica tras transferencia		0.4	0.7	1.0	1.1	1.3	0.9	0.7	0.4
Zona: TR/central		TR	TR	Central	Central	Central	TR	TR	TR

Tabla 8.2.8-3

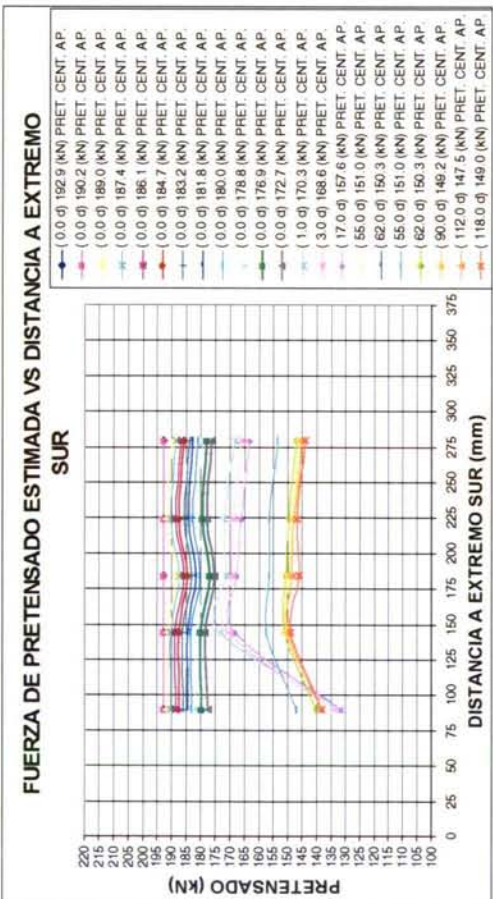
P4C		Anclaje activo	Anclaje pasivo
Deslizamiento máximo (mm)		2.69	3.11
Deslizamiento mínimo (mm)		2.55	2.98



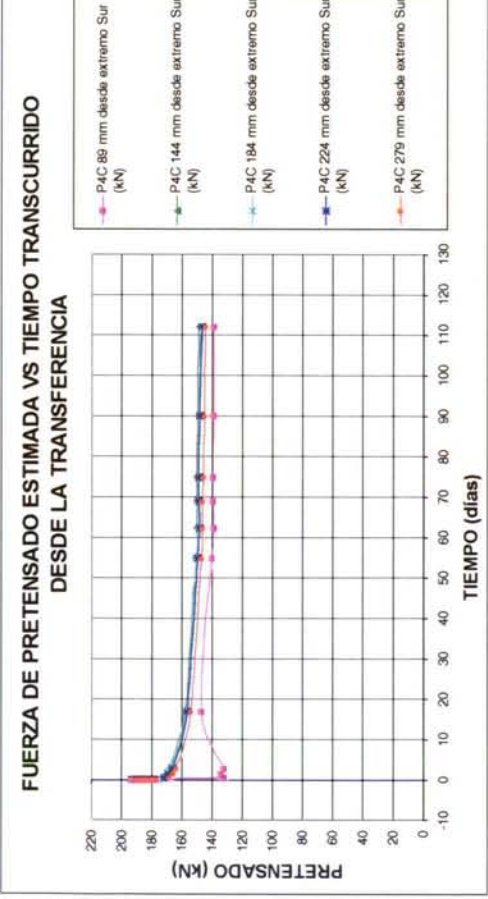
Gráfica 8.2.8-4



Gráfica 8.2.8-6

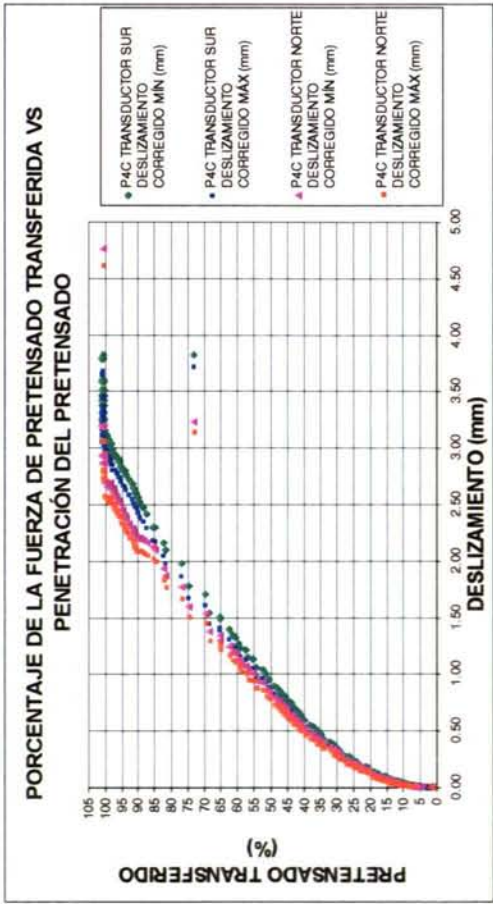


Gráfica 8.2.8-3

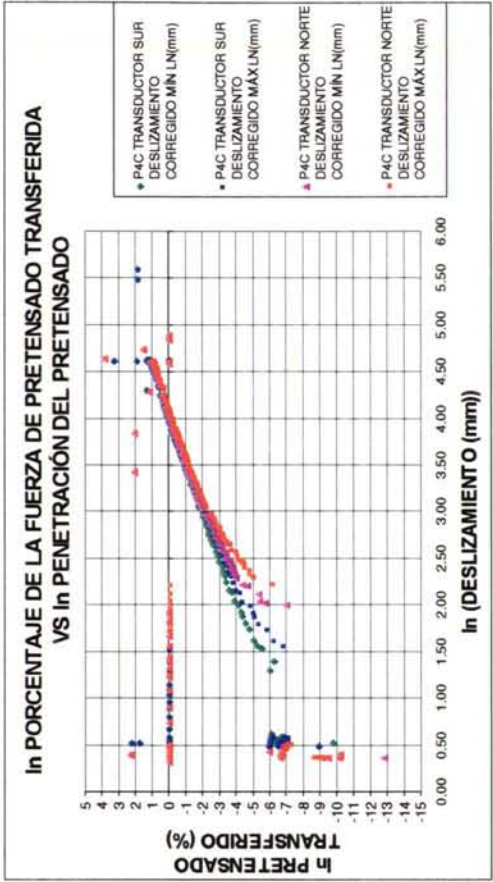


Gráfica 8.2.8-5

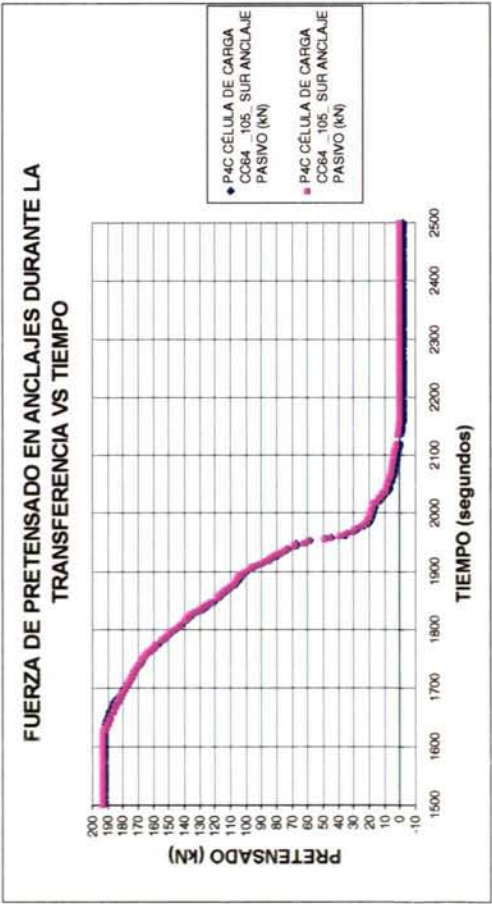




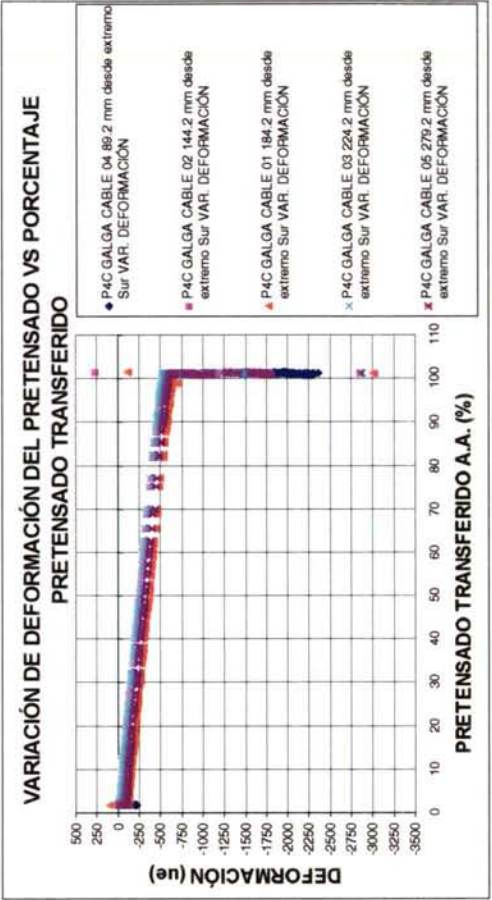
Gráfica 8.2.8-7



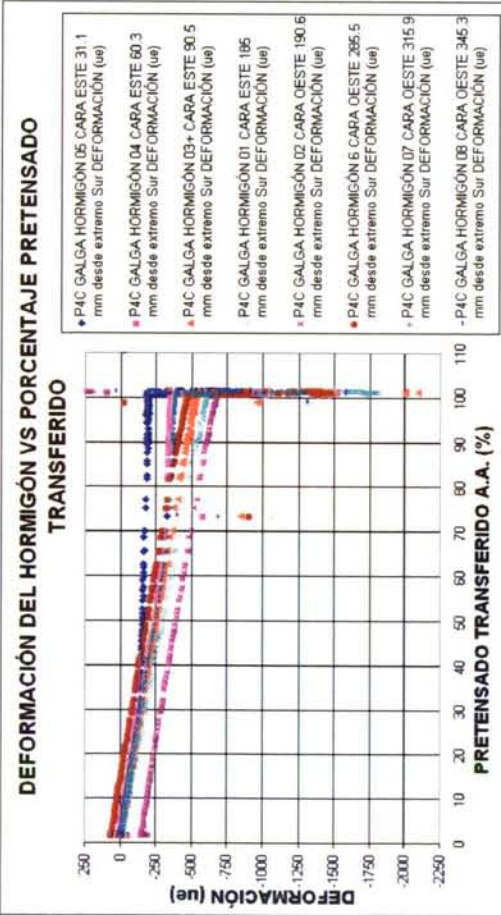
Gráfica 8.2.8-8



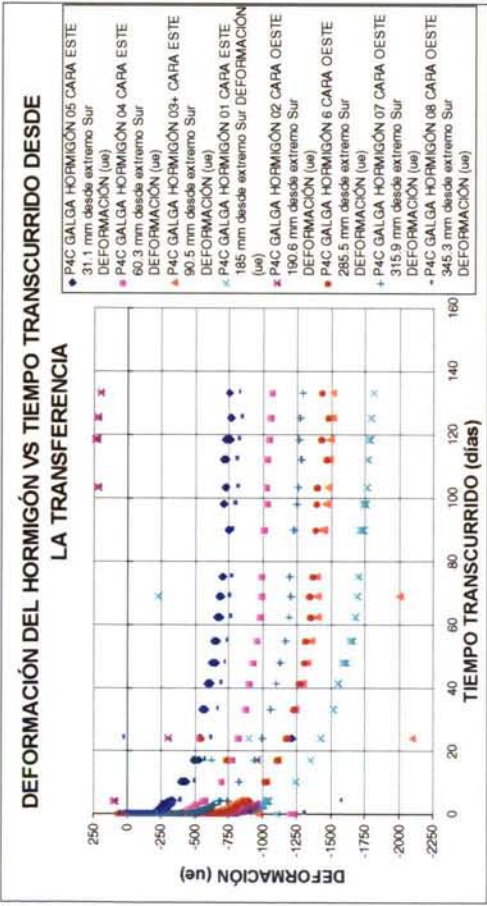
Gráfica 8.2.8-9



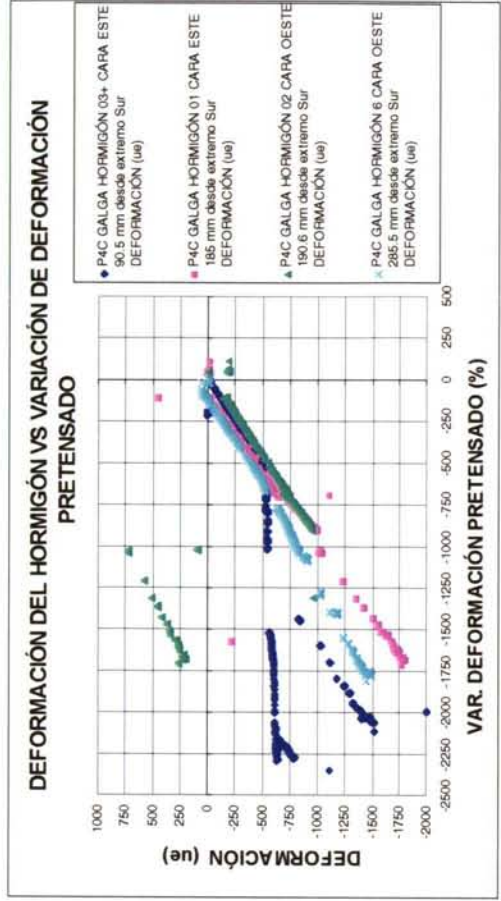
Gráfica 8.2.8-10



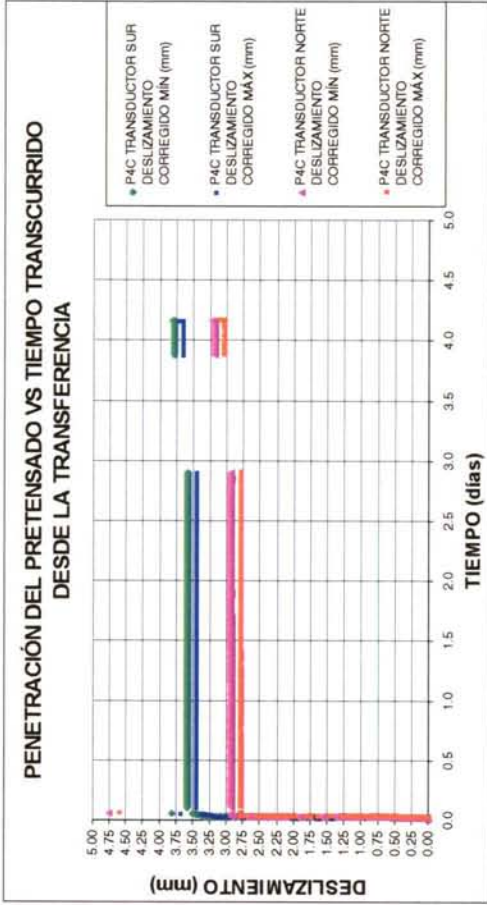
Gráfica 8.2.8-11



Gráfica 8.2.8-13



Gráfica 8.2.8-12



Gráfica 8.2.8-14



## 8.2.9. RESUMEN Y CONCLUSIONES

### 8.2.9.1. Resumen

En la Tabla 8.2.9.1-1 se resumen los resultados de la instrumentación de los prismas. Hay que puntualizar que las pérdidas instantáneas teóricas y experimentales están referidas a la fuerza de pretensado inmediatamente antes de la transferencia, determinada a través de las células de carga de ambos anclajes.

Se presenta para cada prisma el valor teórico de penetración de pretensado máximo, determinado suponiendo que la tensión del pretensado varía linealmente a lo largo de la longitud de transmisión, y que las deformaciones de la sección siguen una ley plana dentro de la misma (a pesar de que esto no sucede en la longitud de desarrollo) (CM90, 6.9.11.4). Para esta estimación se ha tomado como valor aproximado de la longitud de transmisión un metro, y se ha operado con las características medias de la bobina a la que pertenece el cordón de todos estos ensayos.

$P_2$  Fuerza de pretensado antes de la transferencia.

$P_3^*$  Fuerza de pretensado teórica inmediatamente después de la transferencia, determinada según el Apartado 9.1.

$P_3$  Fuerza de pretensado estimada a través de las galgas de pretensado.

En la Tabla 8.2.9.1-1 se resumen las características de los prismas de cada material: características del hormigón a la edad de transferencia, duración de la transferencia, penetración del pretensado en los anclajes activo y pasivo, pérdidas de pretensado estimadas y teóricas y deformación media del hormigón en la zona central.

Tabla 8.2.9.1-1

Prisma	Duración trans-ferencia	Fuerza de pretensado antes transferencia (media ambos anclajes)	Módulo de deformación	Penetración lado activo máx	Penetración lado activo mín	Penetración lado pasivo máx	Penetración lado pasivo mín	Penetración máxima de pretensado	Fuerza de pretensado estimada central tras transferencia	Porcentaje pérdidas pretensado zona central reales	Porcentaje pérdidas pretensado zona central teóricas	Deformación hormigón real	Longitud de transmisión a.a.	Longitud de transmisión a.p.	Deformación hormigón teórica
	s	$P_2$	$E_{m,2}$	$\delta_{Máx}$	$\delta_{Mín}$	$\delta_{Máx}$	$\delta_{Mín}$	$\delta < 0.5 \frac{P_2}{A_p E_p} l_{bpt}$	$P_3$	$\frac{P_2 - P_3}{P_2} \%$	$\frac{P_2 - P_3^*}{P_2} \%$	$\epsilon_c$	$l_{bpt}$	$l_{bpt}$	$\epsilon_c$
		kN	MPa	mm	mm	mm	mm	mm	kN	%	%	ue	m	m	ue
P1L10-1	550	187.6	19640	2.69	2.56	2.82	2.68	3.34	170.3	9.2	11.6	-785	<1.30	<0.875	-776
P2L10-1	600	187.2	20687	3.21	3.08	2.97	2.84	3.33	164.5	12.1	11.1	-783	<0.90	<0.95	-739
P3L10-1	525	188.3	20985	2.66	2.53	2.90	2.77	3.35	168.6	10.5	11.0	-758	<1.51	>0.91	-734
P1L3-1	150	187.6	20269	3.38	3.24	2.25	2.11	3.34	164.2	12.5	11.3	-779	>96.2	$\bar{\epsilon}$	-755
P2L3-1	800	188.6	20645	3.30	3.16	3.16	3.02	3.36	172.3	8.7	11.1	-891	<0.89	<0.96	-746
P3L3-1	525	189.5	21128	2.43	2.29	2.61	2.47	3.37	167.6	11.6	10.9	-769.4	<0.97	<0.98	-734.3
P3C	1600	191.9	31153	2.56	2.42	2.49	2.36	3.41	176.3	8.1	7.7	-569	<0.91	<0.9	-523
P4C	500	192.9	31103	2.69	2.55	3.11	2.98	3.43	192.9	9.2	7.7	-596	<1.51	<0.91	-526

Tabla 8.2.9.1-2: Resumen por material y comparación con el hormigón convencional

Material	Duración transferencia	Módulo de deformación	Fuerza de pretensado antes transferencia (media ambos anclajes)	Penetración lado activo máx	Penetración lado activo mín	Penetración lado pasivo máx	Penetración lado pasivo mín	Fuerza de pretensado estimada central tras transferencia	Porcentaje pérdidas pretensado zona central reales	Porcentaje pérdidas pretensado zona central teóricas	Deformación hormigón real
	s	MPa	$P_2$	mm	mm	mm	mm	$P_3$	$\frac{P_2 - P_3}{P_2} \%$	$\frac{P_2 - P_3^*}{P_2} \%$	ue
HL10-1	558.3	20438	187.7	2.9	2.7	2.9	2.8	167.8	10.6	11.2	-775.3
HL3-1	491.7	20681	188.6	3.0	2.9	2.7	2.5	168.0	10.9	11.1	-813.1
HC	1050.0	31128	192.4	2.6	2.5	2.8	2.7	184.6	8.7	7.7	-582.5
HL10-1/HC		0.66	0.98	1.09	1.10	1.03	1.03	0.91	1.23	1.46	1.33
HL3-1/HC		0.66	0.98	1.16	1.17	0.95	0.95	0.91	1.26	1.44	1.40



### 8.2.9.2. Conclusiones

En las Tablas 8.2.9.1-1 y 8.2.9.1-2 se presenta un resumen de los principales resultados de la fabricación de los prismas. En la Tabla 8.2.9.1-2 se resumen los resultados por material, y se efectúa una comparación de los prismas de hormigón ligero, respecto a los de hormigón convencional.

Las pérdidas producidas en bancada antes de la transferencia son elevadas en los prismas de hormigón ligero (del orden del 2-3%). Estas pérdidas están motivadas por la relajación del pretensado, posible asentamiento diferido de las cuñas de anclaje (según COUS86a), y debido a la retracción/entumecimiento del hormigón en la bancada (CALA99). El único factor dependiente del tipo de hormigón es el último: el hormigón ligero presenta ocasionalmente entumecimiento a edades tempranas (véase Capítulo 4), lo que puede motivar disminución de la fuerza de pretensado registrada en los anclajes por las células de carga.

En el prisma P3C no se aprecia pérdida antes de la transferencia, en el prisma P4C se aprecia una pérdida previa a la transferencia del 2% aproximadamente, valor similar al que presentan los prismas de HC.

Los prismas de hormigón ligero presentan unas pérdidas instantáneas superiores a las de los prismas de hormigón convencional, debido a su menor módulo de deformación. Las pérdidas instantáneas son un 25% de media superiores a las que presenta el hormigón convencional, para los materiales ensayados. La deformación del hormigón de la zona central es también superior en los prismas de hormigón ligero, del orden de un 35 a 40% superior.

Consecuentemente la fuerza de pretensado transferida es un 10% inferior en los prismas de hormigón ligero, a pesar de lo cual la longitud de transmisión tras la transferencia es similar a la del hormigón convencional. Para la estimación de la fuerza de pretensado teórica tras pérdidas se ha empleado el módulo de deformación secante según la normativa ASTM C 469.

Los valores de penetración del pretensado tras la transferencia son superiores en el hormigón ligero, hasta un 16% mayores, lo que indica una peor adherencia de este material. Además, en el prisma P3L10-1, los valores obtenidos experimentalmente para la penetración en HL son muy elevados, aproximándose a la cota superior teórica calculada. En el prisma P3L10-1, que permaneció instrumentado durante varios meses, se aprecia un aumento de la penetración del pretensado con el tiempo, lo que implica pérdida de adherencia diferida, debida a la fisuración longitudinal. Se aprecia una mayor estabilización de las pérdidas de pretensado en los prismas de hormigón convencional. Lo mismo se observa respecto a las deformaciones del hormigón en la zona central. En varios prismas de hormigón ligero se aprecian pérdidas de pretensado elevadas en el tiempo, indicios de la pérdida de adherencia por fisuración longitudinal.

En algunos prismas de hormigón ligero se aprecia una alteración en el tiempo, de la ley de deformación longitudinal del hormigón a lo largo del elemento, generándose una fuerte curvatura, que implica aparición de tensiones de adherencia en la zona central de la viga. Esto probablemente se debe a un aumento de la zona de transmisión como



consecuencia de la fisuración diferida (dada la ausencia de deformaciones de flexión por las condiciones de apoyo).

No se aprecian diferencias considerables en el comportamiento de los prismas de hormigón ligero de HL10-1 y HL3-1. Paradójicamente, a pesar de la rigidez y resistencia superiores del HL3-1, las pérdidas de pretensado parecen ligeramente superiores en este material, así como la penetración del extremo activo del cable. Respecto a los datos analizados, ambas dosificaciones se comportan como un mismo material.

En general, el comportamiento de la instrumentación empleada es excelente. La incertidumbre de la medida de la penetración, debido a las condiciones de sujeción de los transductores de desplazamiento hacen que la medida manual de la penetración del pretensado, mediante calibre, sea un método barato y sencillo que presenta la misma precisión. La única ventaja de esta medida electrónica es disponer de un registro cuasicontinuo de la penetración del pretensado en el tiempo. Este método manual supone una medida redundante y, por lo tanto, una seguridad adicional frente a fallos del sistema de adquisición electrónico/descalibración de los sensores.

Se confirma la tendencia descrita por el CEB de ajuste de la ley { $\%$ carga transferida} respecto a la {penetración del pretensado} a una ley potencial, para los prismas de los materiales ensayados. El ajuste es óptimo, tras un corto período inicial de la transferencia, que corresponde a la fase de adhesión.

El crecimiento de la deformación del hormigón es marcadamente lineal respecto al porcentaje de carga transferida en las galgas de la zona central. Para las galgas de los extremos, el crecimiento es lineal hasta que se produce el deslizamiento, instante en que se pierde la linealidad, disminuyendo el gradiente de la ley de deformación, debido a la pérdida de adherencia.

El aumento de la pérdida de deformación del pretensado respecto a la carga transferida es marcadamente lineal en las galgas situadas en la zona central. En las galgas de los extremos, la ley es lineal hasta que, debido al deslizamiento, se produce un aumento del gradiente de la pérdida de deformación, indicio de pérdida de adherencia local.

#### **8.2.10. DESCRIPCIÓN DE LA FISURACIÓN OBSERVADA**

Tras la transferencia se comprobó en todos los casos la ausencia de fisuras en las caras visibles (todas menos la inferior). Todos los prismas de hormigón ligero fisuraron longitudinalmente. La fisuración se detectó tiempo después de la transferencia, transcurridos días o semanas de la misma (Tabla 8.2.10-1). Generalmente las fisuras comenzaron en los extremos de los prismas. Las fisuras se propagaron en todos los casos a lo largo de todo el prisma, gradualmente, en un proceso que duró días.

Ninguno de los prismas de la dosificación estudiada de HC presentó fisuras visibles longitudinales.

Tan sólo en un caso, el prisma P1L3-1, se produjo fisuración en el instante de la transferencia, debida a estallido, como se manifiesta en las Fotografías 8.2.4-1 y 8.2.4-2.



Tabla 8.2.10-1

Prisma	Fecha transferencia	Fecha detección fisuras	Días	Norte	Sur
P1L10-1	22-1-99	<25-3-99	<62	SUP	E/W
P1L3-1	28-01-99	<15-3-99	<46	E	W
P3C	4-2-99	No			
P2L3-1	12-2-99	15-3-99	31	W	E/W
P2L10-1	19-02-99	26-3-99	35	E/W	
P4C	26-2-99	No			
P3L3-1	5-3-99	26-3-99	21	I/N/E	E
P3L10-1	12-03-99	15-4-99	34	E/W	E/W

donde:

SUP = cara superior; I = cara inferior; W = cara Oeste; E = cara Este.

En el Anexo 7 se presenta un mapa de cada prisma, donde se detalla la posición y tipo de fisuras observadas.

### 8.3. ANÁLISIS DE LAS MEDIDAS DE LOS EXTENSÓMETROS MECÁNICOS

#### 8.3.1. INTRODUCCIÓN

Como se explicó en el Capítulo 6, tras el desencofrado de los prismas, se dispusieron discos de extensometría en ambos paramentos laterales de los prismas, a la altura del centro de gravedad del cordón de pretensado. La distancia media entre esos discos fue de 50 mm. La medida de deformación se efectúa con extensómetro mecánico de 100 mm de longitud base, de  $1.67 \times 10^{-5}$  de precisión en la medida de la deformación (es decir, aproximadamente 20 ue) dotado de barra de referencia Invar (véanse Fotografías 8.3.1-1 y 8.3.1-2).



Fotografía 8.3.1-1



Fotografía 8.3.1-2

El ajuste de la ley de deformaciones resultante se realiza mediante dos modelos:

- El modelo lineal, que ajusta una ley lineal a la deformación de la zona de transmisión, de parámetros la ordenada en el origen y la pendiente. En la zona central del prisma, donde no existen tensiones de adherencia, se plantea una recta horizontal, de parámetro su ordenada en el origen (Figura 8.3.1-1).

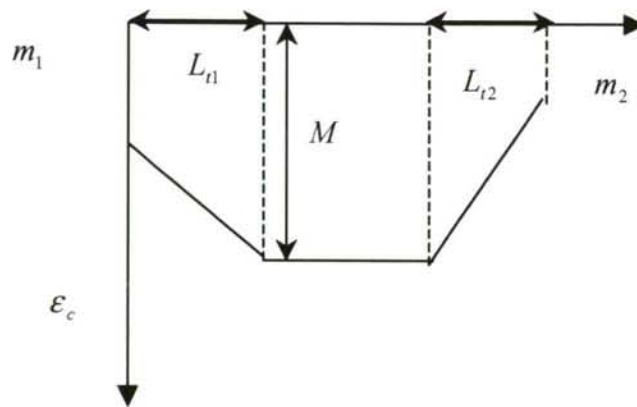


Figura 8.3.1-1

Los parámetros del modelo tienen el siguiente significado físico:

- $m_1, m_2$  deformación por retracción a la edad de medida, en los extremos 1 y 2 del elemento considerado
- $L_{t1}, L_{t2}$  longitudes de transmisión de los extremos 1 (Norte) y 2 (Sur) del elemento considerado
- $M$  deformación total en la zona central de adherencia perfecta: incluye deformación tensional y deformación diferida por retracción y fluencia

Los parámetros a determinar son, pues:

$$m_1, m_2, M, L_{t1}, L_{t2}$$

- El modelo exponencial, que ajusta una ley exponencial genérica a la ley experimental de deformación en la zona de transmisión. En la zona central del prisma, donde no existen tensiones de adherencia, se plantea una recta horizontal (Figura 8.3.1-2).

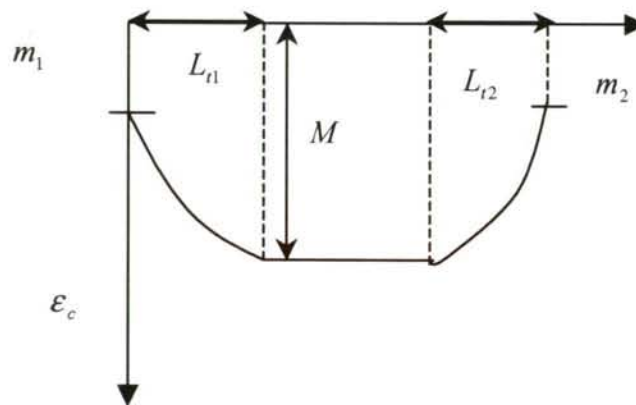


Figura 8.3.1-2

En el modelo exponencial, las leyes de deformación en los extremos son:

$$\bar{\epsilon}_c^-(x) = a_1 + b_1 e^{c_1 x}$$

$$\bar{\epsilon}_c^-(x) = a_2 + b_2 e^{c_2 x}$$



donde:

$x$	distancia desde el extremo Sur a la sección considerada
$\bar{\epsilon}_c(x)$	estimación de la deformación del modelo empleado
$\epsilon_c(x)$	valor de la deformación a partir de las medidas experimentales
$a_1, b_1$	están determinados por las condiciones de contorno
$a_2, b_2$	están determinados por las condiciones de contorno

Los parámetros a determinar son, pues:

$$m_1, m_2, M, L_{t1}, L_{t2}, c_1, c_2$$

Para ajustar los modelos lineal y exponencial se ha empleado el Solver de Excel, consistente en un conjunto de subrutinas de optimización. Para facilitar la realización de los ajustes, se creó un entorno basado en VBA para Excel que simplificaba la realización de gráficas y el ajuste de los parámetros.

Se parte inicialmente de una solución inicial para nuestros parámetros del modelo, para la cual se puede evaluar el error cometido entre los datos reales que tenemos (nuestras medidas) y el valor pronosticado por el modelo.

La función objetivo es la minimización del error cuadrático medio existente entre los valores estimados por nuestro modelo y los valores experimentales. Las variables son los parámetros de que depende el modelo propuesto. No se han impuesto restricciones.

La subrutina empleada busca iterativamente parámetros con el objetivo de minimizar el error cuadrático medio, hasta obtener una convergencia suficiente. El control de la bondad del ajuste se realiza con el coeficiente  $R^2$ .

A continuación se presentan los resultados del análisis de las medidas tomadas tras la transferencia, y hasta transcurrido un año de la misma.

Se denomina ERR. CUAD. al error cuadrático medio, multiplicado por  $10^7$ :

$$ERR.CUAD. = 10^7 \cdot \sum_1^{nt} (\epsilon_c(x) - \bar{\epsilon}_c(x))^2$$

En cada extremo se proporciona el valor:

$R^2 L_{t1}$	Coeficiente $R^2$ del ajuste considerado, en el extremo 1
$R^2 L_{t2}$	Coeficiente $R^2$ del ajuste considerado, en el extremo 2
$nt$	número total de puntos de medida a lo largo del elemento

### 8.3.2. Prisma P1L10-1

La deformación instantánea media del hormigón en la zona central es de  $-8.15E-4$ , cara Este y de  $-8.2E-4$  en la cara Oeste, mediante el método lineal. La deformación media entre ambas caras es de  $-8.175E-4$ .

En las Gráficas 8.3.2-1 y 8.3.2-2 se observa el comportamiento de la ley de deformaciones del hormigón a lo largo del prisma, desde la transferencia hasta un año después, aplicando el modelo lineal y exponencial respectivamente a los datos de la cara Este. Las Gráficas 8.3.2-3 y 8.3.2-4 son análogas, excepto que los datos corresponden a la cara Oeste.

En las cuatro gráficas se aprecia un cambio de comportamiento entre los 21 y los 23 días después de la transferencia. La medida a los 23 días no estaba programada, se realizó tras detectar la fisuración longitudinal del prisma en el Norte, extremo activo, a la edad de 21 días.

Hasta esa edad las zonas de transmisión mantienen una longitud constante en ambos extremos. En esta gráfica, al igual que en las siguientes, se aprecia una cierta ondulación en la ley de deformación, de una longitud de onda de aproximadamente 250 a 350 mm. Creemos que este efecto ondulatorio es debido a la espiral de los alambres del cordón de pretensado, que acusa la ley de deformaciones debido a la cercanía del paramento del prisma donde se toma la medida.

A los 14 días de la transferencia, tras haber trasladado el prisma se detectó fisuración por hendimiento en la viga en la cara superior, partiendo la fisura de la parte superior del cordón de pretensado de la cara Norte, hasta la cara superior de hormigonado. La longitud de fisura visible a simple vista es de aproximadamente la mitad de la longitud de la viga.

La fisuración es patente en las Gráficas 8.3.2-1 a 8.3.2-4, en las que se aprecia un aumento considerable de la longitud de transmisión del extremo Norte. Esto se pone de manifiesto en el descenso en la zona fisurada del valor absoluto de las deformaciones del hormigón, motivado por la pérdida de pretensado. La longitud de transmisión aumenta un metro, de 750 mm a 2250 mm.

A partir de esa edad se observa:

- El aumento paulatino de la longitud de transferencia, hasta que ambas zonas de transmisión entran prácticamente en contacto transcurrido un año desde la transferencia. Esto significa que prácticamente no existe zona central de adherencia perfecta: las pérdidas de pretensado afectan a toda la longitud del prisma.
- En este caso, con los dos modelos se aprecia una zona central horizontal de pequeña longitud. Esto significa que, matemáticamente hablando, para ambos modelos no se ha generalizado la pérdida de pretensado por fisuración.
- La pendiente de la ley de deformación en el extremo Norte (activo) disminuye y se mantiene prácticamente constante a partir de la fisuración. Esta pendiente está relacionada con el gradiente de fuerza de pretensado, producido por la adherencia residual, debida al rozamiento/efecto de cable. Creemos que hay dos factores que determinan el valor de la pérdida de pendiente de la ley de deformación: por una parte, la propia pérdida de pretensado, y por otra, la pérdida de capacidad adherente debido a la fisuración.
- Debido a la fisuración del prisma se detecta un cambio de tendencia del ajuste exponencial, de cóncavo a convexo: el gradiente de deformación del hormigón



disminuye en la proximidad del extremo fisurado debido a la pérdida de adherencia. El ajuste exponencial “exagera” la fisuración, poniéndola en evidencia.

- El ajuste que proporciona un valor de  $R^2$  más elevado es el modelo exponencial, aunque sólo ligeramente superior, por lo que la correlación es mejor que la del modelo lineal.
- A pesar del aumento de la longitud de transmisión, sigue aumentando la deformación total del hormigón a lo largo de gran parte del elemento: creemos que esto se debe a la deformación por retracción y por fluencia, tanto de la fuerza de pretensado disipada, como de la fuerza de pretensado remanente.
- En este prisma se pone de manifiesto el fenómeno de fisuración diferida de los prismas de hormigón ligero.

En este documento cuando, como en este caso, los valores de la longitud de transmisión en un elemento sean tan elevados que prácticamente desaparezca la zona de adherencia perfecta central, diremos que la *longitud de transmisión es divergente*.

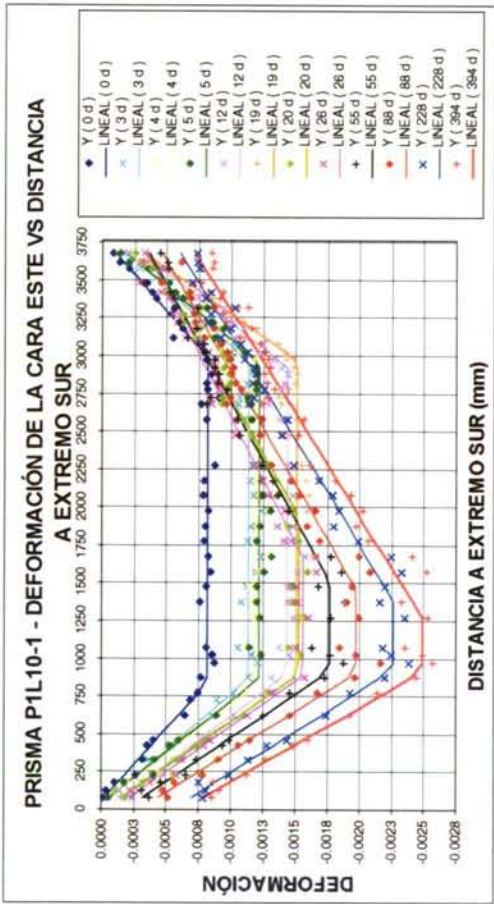
### 8.3.3. Prisma P2L10-1

La deformación instantánea media del hormigón en la zona central es de  $-8.44\text{E-}4$ , cara Este y de  $-7.98\text{E-}4$  en la cara Oeste. La diferencia de valor puede estar debida a una ligera excentricidad accidental del cordón de pretensado en la zona central, o a la heterogeneidad del hormigón. La deformación media de ambas caras es de  $-8.2\text{E-}4$ , valor muy similar al del prisma anterior.

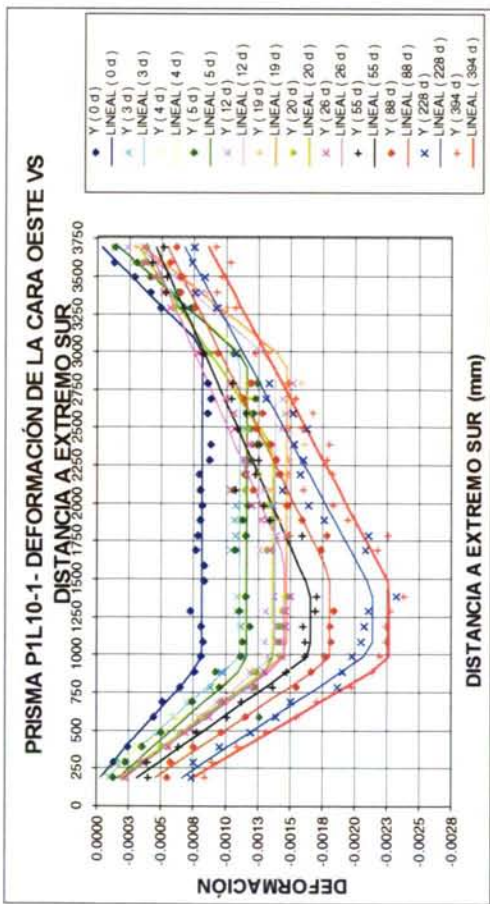
Durante el primer mes siguiente a la transferencia se aprecia una estabilidad del valor de la longitud de transmisión según el ajuste lineal, en ambas caras (Gráficas 8.3.3-1 y 8.3.3-3). Sin embargo, según el ajuste exponencial se evidencia un aumento de la longitud de transmisión de la cara Este en ambos extremos, aumento que no se detecta en la cara Oeste (Gráficas 8.3.3-2 y 8.3.3-4). Entre los 28 días y los dos meses posteriores a la transferencia se observa un aumento considerable de la longitud de transmisión del extremo Sur (anclaje pasivo) del orden de un metro, debido a la fisuración diferida de este prisma.

Al igual que en el anterior, se constata una disminución del gradiente de pretensado en el extremo Sur, debido a la pérdida de adherencia. Según el modelo lineal la pendiente de la ley de deformación en la zona de transmisión Sur se mantiene prácticamente constante.

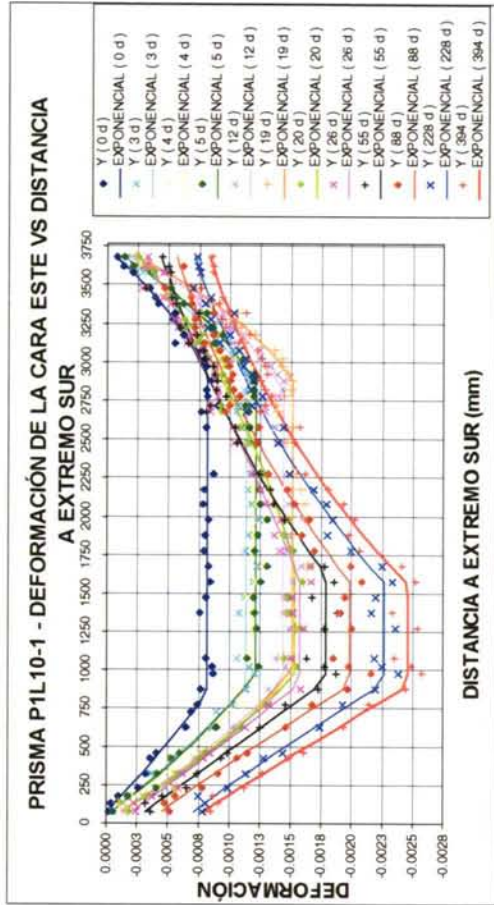
El modelo exponencial parece ajustarse más a la ley de deformaciones antes y tras la fisuración. En la zona fisurada la aproximación exponencial se mantiene cóncava tras la fisuración, en ambas caras.



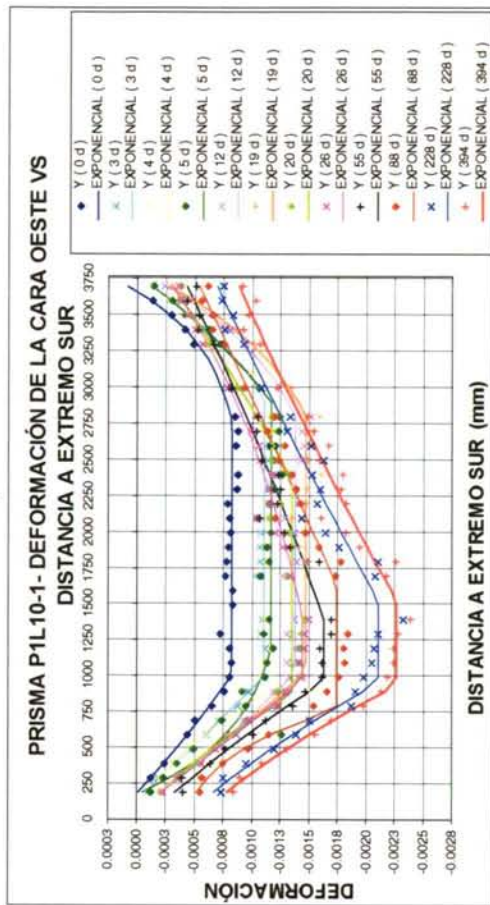
Gráfica 8.3.2-1



Gráfica 8.3.2-3



Gráfica 8.3.2-2



Gráfica 8.3.2-4



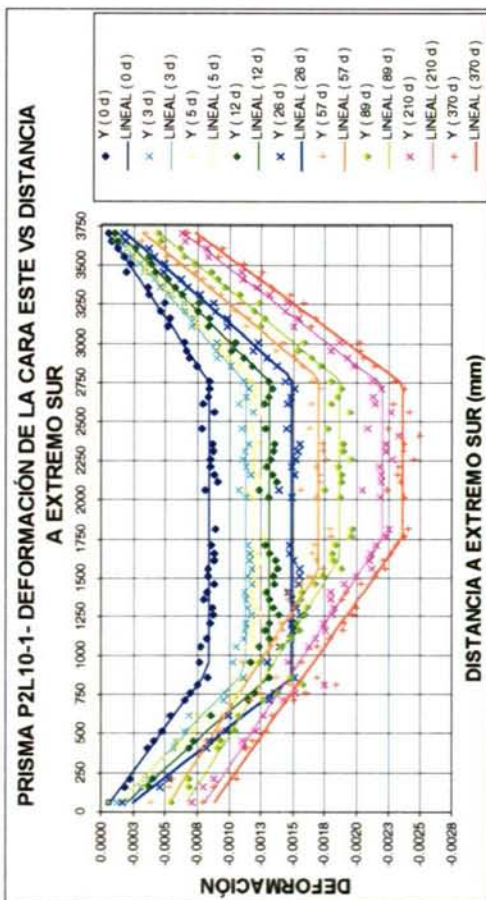
Tabla 8.3.2-1

Cara Este	Def transferencia (0 días)		Def 5 días		Def 6 días		Def 7 días	
	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal
L = 3765 mm								
LT1 =	834	834	882	869	935	814	973	863
LT2 =	870	780	848	810	875	808	901	810
M =	-0.000816	-0.000814	-0.001134	-0.001134	-0.001186	-0.001179	-0.001212	-0.001210
m1 =	0.000073	0.000058	0.000045	0.000026	0.000092	0.000032	0.000082	0.000051
m2 =	0.000076	-0.000010	0.000020	-0.000060	0.000042	-0.000069	0.000059	-0.000058
R^2 =	0.977438	0.976810	0.981500	0.980162	0.979641	0.977475	0.985957	0.984249
R^2 Ld1	0.978197	0.977436	0.983950	0.977704	0.971723	0.978524	0.961171	0.963794
R^2 Ld2	0.96313	0.952658	0.981473	0.972321	0.969628	0.961944	0.983908	0.962776
ERR.CUAD. =	0.701636	0.721161	1.051553	1.127646	1.203781	1.331851	0.901532	1.011184
	Def 14 días		Def 21 días		Def 23 días		Def 28 días	
	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal
LT1 =	932	895	1014	886	961	895	907	886
LT2 =	956	844	884	800	2091	1825	2165	2096
M =	-0.001434	-0.001429	-0.001508	-0.001506	-0.001528	-0.001520	-0.001564	-0.001556
m1 =	0.000032	-0.000038	0.000057	-0.000041	0.000017	-0.000037	-0.000086	-0.000095
m2 =	-0.000005	-0.000172	0.000009	-0.000174	-0.000157	-0.000293	-0.000252	-0.000285
R^2 =	0.979051	0.975233	0.978256	0.973642	0.975417	0.966551	0.975805	0.975431
R^2 Ld1	0.988496	0.983819	0.966946	0.959393	0.970099	0.967564	0.986918	0.987121
R^2 Ld2	0.983684	0.961665	0.981920	0.964017	0.962514	0.930631	0.960054	0.958937
ERR.CUAD. =	1.731319	2.046861	1.859994	2.254692	1.995369	2.715009	1.918913	1.948531
	Def 55 días		Def 88 días		Def 228 días		Def 394 días	
	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal
LT1 =	928	919	898	907	911	933	890	914
LT2 =	2134	2258	2192	2311	2192	2382	2202	2488
M =	-0.001778	-0.001766	-0.001976	-0.001973	-0.002259	-0.002264	-0.002455	-0.002486
m1 =	-0.000184	-0.000187	-0.000325	-0.000301	-0.000593	-0.000553	-0.000656	-0.000634
m2 =	-0.000403	-0.000304	-0.000522	-0.000401	-0.000673	-0.000537	-0.000792	-0.000651
R^2 =	0.977955	0.972898	0.976841	0.972396	0.982413	0.974533	0.980695	0.972928
R^2 Ld1	0.989335	0.989328	0.990253	0.989839	0.985668	0.984503	0.989839	0.989574
R^2 Ld2	0.952898	0.949708	0.963042	0.958174	0.973622	0.961246	0.969069	0.955080
ERR.CUAD. =	2.174790	2.673689	2.554804	3.045211	2.390624	3.461714	2.779193	3.897375

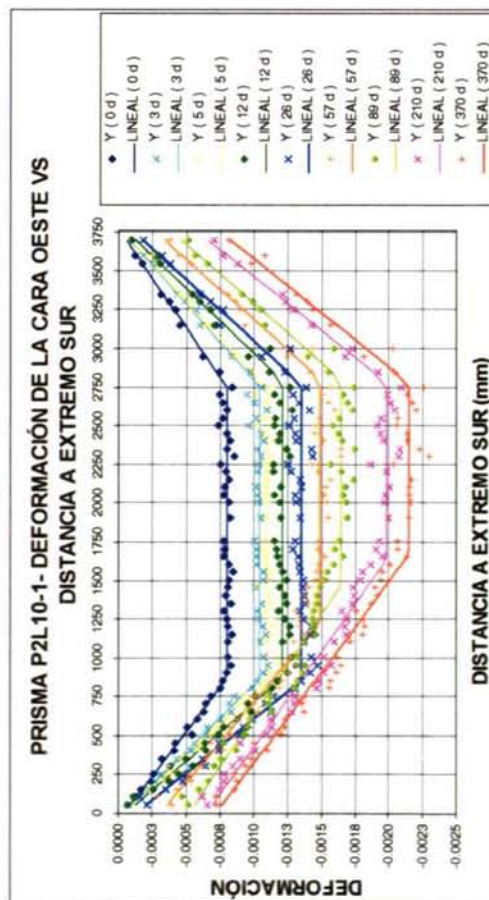
Tabla 8.3.2-2

Cara Oeste	Def transferencia (0 días)		Def 5 días		Def 6 días		Def 7 días	
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
L = 3765 mm								
LT1 =	1000	957	985	985	888	888	1172	936
LT2 =	1000	728	828	793	851	805	867	824
M =	-0.000822	-0.000817	-0.001107	-0.001107	-0.001165	-0.001156	-0.001165	-0.001161
m1 =	0.000209	0.000169	0.000164	0.000163	0.000038	0.000273	0.000558	0.000076
m2 =	0.000276	0.000061	0.000001	-0.000063	0.000002	-0.000065	-0.000006	-0.000072
R^2 =	0.975487	0.979612	0.988338	0.987352	0.963230	0.956589	0.912724	0.897756
R^2 Ld1	0.993834	0.995065	0.996174	0.996174	0.987417	0.984815	0.788797	0.665934
R^2 Ld2	0.987205	0.973866	0.999642	0.993041	0.998465	0.993140	0.994812	0.987205
ERR.CUAD. =	0.372423	0.309754	0.418689	0.454124	1.612431	1.903667	3.644047	4.269021
	Def 14 días		Def 21 días		Def 23 días		Def 28 días	
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
LT1 =	1014	1002	1018	1005	856	931	969	964
LT2 =	976	844	956	824	1421	1405	2377	2122
M =	-0.001379	-0.001381	-0.001467	-0.001466	-0.001354	-0.001365	-0.001445	-0.001453
m1 =	0.000090	0.000033	0.000099	0.000063	0.000016	0.000097	0.000107	0.000080
m2 =	-0.000058	-0.000217	-0.000098	-0.000240	-0.000235	-0.000264	-0.000245	-0.000355
R^2 =	0.979482	0.974795	0.982170	0.979638	0.967785	0.968583	0.978446	0.968980
R^2 Ld1	0.989487	0.988273	0.990542	0.990366	0.996681	0.988003	0.993939	0.993732
R^2 Ld2	0.997309	0.961765	0.998084	0.978097	0.973620	0.972288	0.961240	0.935819
ERR.CUAD. =	1.004334	1.233759	0.990232	1.130888	1.555956	1.517439	0.994008	1.430526
	Def 55 días		Def 88 días		Def 228 días		Def 394 días	
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
LT1 =	952	997	754	965	949	1028	930	959
LT2 =	2377	2334	2136	2241	2245	2339	2239	2296
M =	-0.001633	-0.001650	-0.001738	-0.001805	-0.002105	-0.002138	-0.002267	-0.002267
m1 =	-0.000078	-0.000010	-0.000395	-0.000133	-0.000383	-0.000328	-0.000498	-0.000380
m2 =	-0.000388	-0.000419	-0.000498	-0.000504	-0.000649	-0.000630	-0.000841	-0.000817
R^2 =	0.968273	0.966815	0.962571	0.971474	0.954727	0.955127	0.967690	0.966598
R^2 Ld1	0.984535	0.986854	0.980979	0.985136	0.978173	0.973949	0.992172	0.988911
R^2 Ld2	0.942108	0.926590	0.947575	0.947519	0.929180	0.928745	0.934893	0.934071
ERR.CUAD. =	1.606967	1.680822	2.042824	1.556947	3.290978	3.261912	2.336396	2.415388

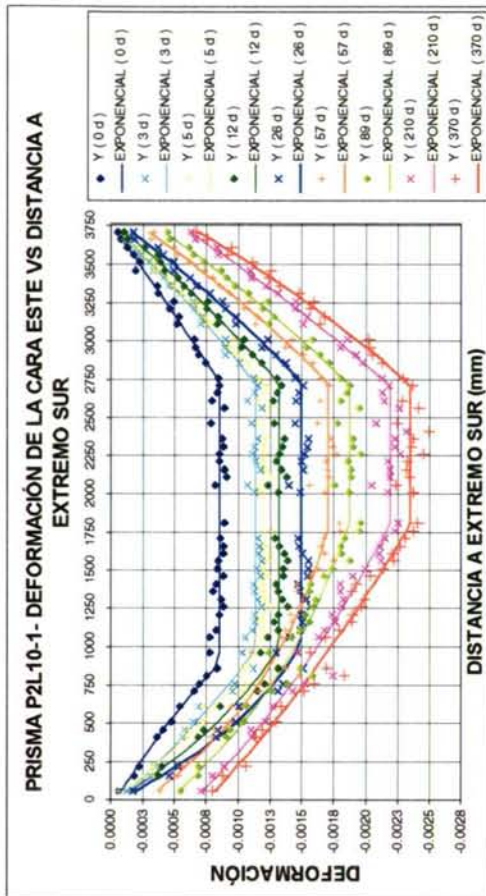




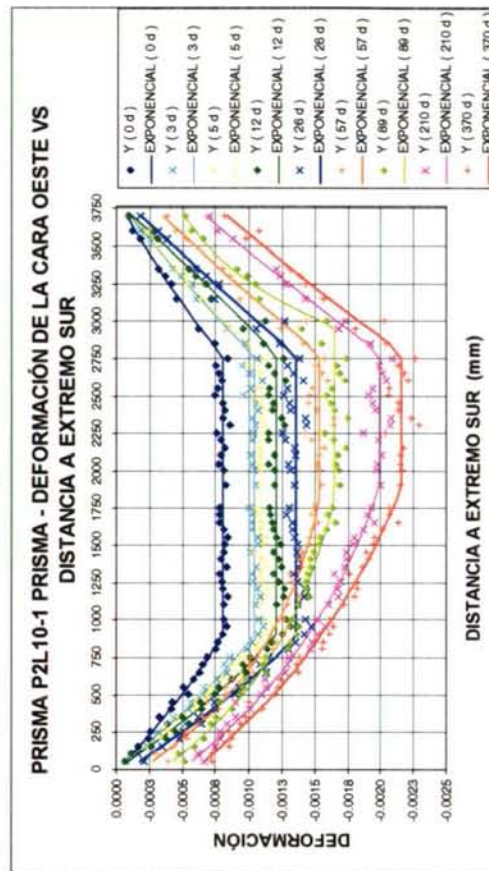
Gráfica 8.3.3-1



Gráfica 8.3.3-3



Gráfica 8.3.3-2



Gráfica 8.3.3-4

Tabla 8.3.3-1

Cara Este	P2L10-2									
	Def transfrancia (0 días)		Def 5 días		Def 7 días		Def 14 días		Def 28 días	
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
L = 3760 mm										
LT1 =	888	917	980	903	1026	914	988	865	1008	850
LT2 =	1026	1012	1048	1011	1052	1018	1040	1002	1030	978
M =	-0.000844	-0.000844	-0.001132	-0.001127	-0.001202	-0.001199	-0.001319	-0.001312	-0.001492	-0.001483
m1 =	-0.000043	-0.000011	-0.000069	-0.000075	0.000000	-0.000065	-0.000052	-0.000114	-0.000064	-0.000153
m2 =	0.000015	0.000003	0.000027	-0.000019	0.000025	-0.000021	-0.000021	-0.000058	-0.000069	-0.000108
R <sup>2</sup> =	0.986564	0.986004	0.986898	0.987413	0.987492	0.985786	0.985141	0.986998	0.985240	0.986403
R <sup>2</sup> L1	0.995458	0.992562	0.965171	0.977795	0.966287	0.961995	0.942468	0.980382	0.954634	0.977394
R <sup>2</sup> L2	0.987466	0.987078	0.990797	0.988948	0.991505	0.989723	0.992017	0.988342	0.991744	0.989525
ERR.CUAD. =	0.529685	0.551759	0.804717	0.773072	0.891445	1.013055	1.173929	1.027172	1.509729	1.390740
	Def 210 días									
	Exponencial		Lineal		Exponencial		Lineal		Exponencial	
LT1 =	1758	1536	1805	1624	1808	1744	1808	1759		
LT2 =	1028	980	1046	994	1055	1024	1053	1015		
M =	-0.001697	-0.001694	-0.001868	-0.001863	-0.002189	-0.002193	-0.002352	-0.002356		
m1 =	-0.000278	-0.000491	-0.000464	-0.000627	-0.000664	-0.000762	-0.000763	-0.000837		
m2 =	-0.000198	-0.000242	-0.000318	-0.000362	-0.000507	-0.000554	-0.000575	-0.000647		
R <sup>2</sup> =	0.973154	0.962141	0.974267	0.966717	0.980207	0.977716	0.980908	0.978842		
R <sup>2</sup> L1	0.945578	0.890627	0.945828	0.911739	0.967447	0.955966	0.967669	0.961768		
R <sup>2</sup> L2	0.989185	0.986338	0.987798	0.984628	0.991146	0.987848	0.988918	0.983599		
ERR.CUAD. =	2.913851	4.109180	3.032000	3.921552	2.768316	3.116639	2.993159	3.317172		

Tabla 8.3.3-2

Cara Oeste	P2L10-2									
	Def transfrancia (0 días)		Def 5 días		Def 7 días		Def 14 días		Def 28 días	
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
L = 3760 mm										
LT1 =	902	867	896	863	873	840	906	866	877	853
LT2 =	995	1011	993	1003	1011	1017	990	966	991	990
M =	-0.000798	-0.000797	-0.001035	-0.001034	-0.001097	-0.001096	-0.001204	-0.001204	-0.001348	-0.001348
m1 =	-0.000006	-0.000041	0.000011	-0.000036	0.000019	-0.000021	0.000014	-0.000052	-0.000080	-0.000126
m2 =	-0.000036	-0.000007	-0.000042	-0.000018	-0.000058	-0.000025	-0.000036	-0.000053	-0.000107	-0.000101
R <sup>2</sup> =	0.988539	0.987469	0.986738	0.985833	0.988552	0.987701	0.981795	0.980626	0.976725	0.976232
R <sup>2</sup> L1	0.985836	0.982855	0.982409	0.979331	0.986572	0.982187	0.986030	0.981218	0.983529	0.981529
R <sup>2</sup> L2	0.993632	0.991050	0.993893	0.993036	0.992862	0.991953	0.964123	0.964018	0.946674	0.946578
ERR.CUAD. =	0.393159	0.429862	0.687209	0.734133	0.747981	0.803559	1.377822	1.466267	2.045930	2.089259
	Def 370 días									
	Exponencial		Lineal		Exponencial		Lineal		Exponencial	
LT1 =	1799	1227	1812	1472	1903	1632	1877	1663		
LT2 =	973	957	792	959	970	977	970	980		
M =	-0.001529	-0.001488	-0.001643	-0.001644	-0.001989	-0.001979	-0.002158	-0.002148		
m1 =	-0.000179	-0.000312	-0.000345	-0.000520	-0.000492	-0.000652	-0.000590	-0.000722		
m2 =	-0.000281	-0.000263	-0.000475	-0.000378	-0.000595	-0.000576	-0.000761	-0.000738		
R <sup>2</sup> =	0.976085	0.964146	0.973227	0.961492	0.986297	0.976232	0.983261	0.976866		
R <sup>2</sup> L1	0.978362	0.964552	0.977845	0.933850	0.983858	0.956788	0.986611	0.972339		
R <sup>2</sup> L2	0.953114	0.952613	0.972834	0.952852	0.990132	0.989722	0.957439	0.956808		
ERR.CUAD. =	2.234441	3.349896	2.360763	3.395568	1.660202	2.879568	2.260710	3.124427		



### 8.3.4. Prisma P3L10-1

La deformación instantánea de la zona central es de  $-8.1\text{E-}4$  en la cara Este y de  $-8.5\text{E-}4$  en la cara Oeste, por lo que la media es de  $-8.3\text{E-}4$ , valor muy similar al de los prismas anteriores del mismo material.

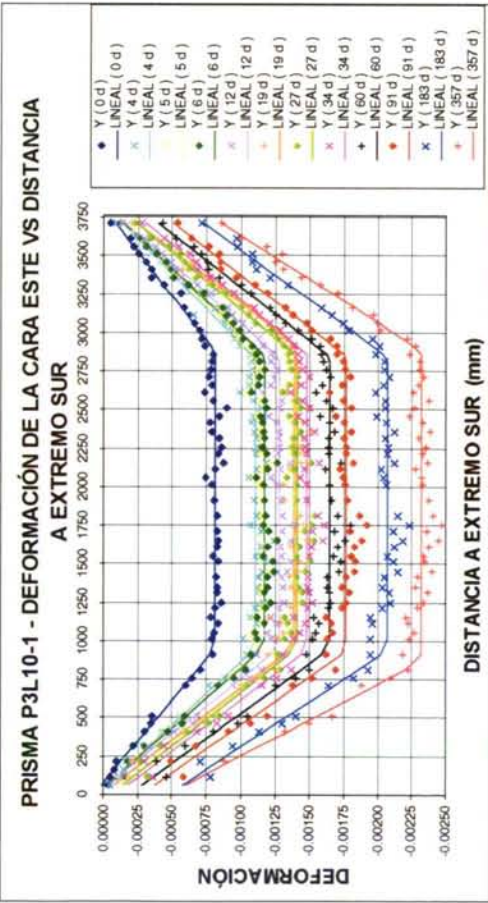
Este prisma fisuró longitudinalmente, detectándose la fisuración transcurridos 34 días desde la transferencia. La fisuración comenzó en el extremo Norte, se produjo en la cara Este y Oeste.

A pesar de este hecho, en las Gráficas 8.3.4-1 a 8.3.4-4 no se aprecia ninguna variación de comportamiento apreciable. Según el modelo lineal la longitud de transmisión de ambos extremos se mantiene constante. Según el modelo exponencial la longitud de transmisión del extremo Sur, cara Este, aumenta ligeramente desde la edad de transferencia. En este extremo, en la cara Este, se aprecia un cambio de curvaturas de la ley de deformaciones, desde la transferencia, en que es convexa, hasta el año después, en que es cóncava. En la Gráfica 8.3.4-2, se aprecia un aumento de la longitud de transmisión a la edad de 21 días, edad cercana a la de detección de las fisuras, pero puede estar motivado por un fallo en la medida manual.

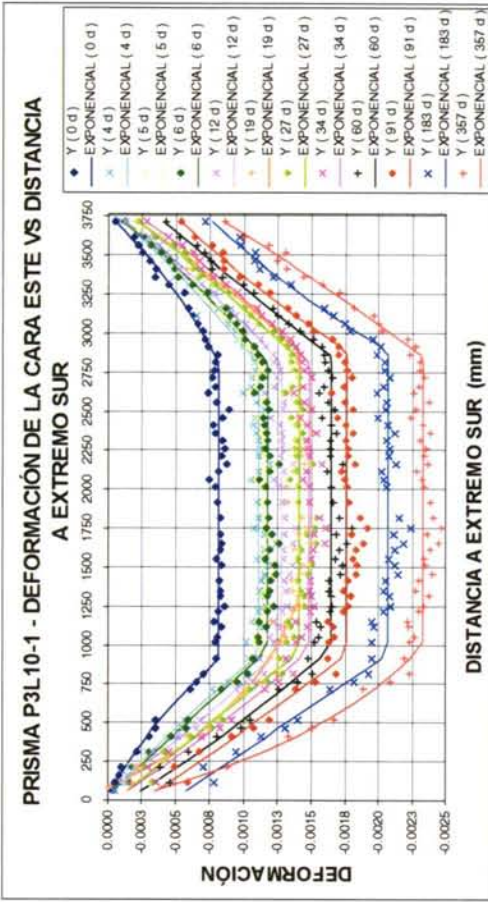
Al igual que en los prismas anteriores, el modelo exponencial presenta un valor del coeficiente  $R^2$  global superior al lineal.

Este prisma es el único de hormigón ligero que no presenta un comportamiento divergente de la longitud de transmisión. El proceso de fabricación e instrumentación fue el mismo que en el resto de los prismas, excepto que este prisma no se trasladó tras la transferencia, puesto que fue el último en fabricarse y no era necesario desocupar la bancada. La fisuración de este prisma se presentó al cabo de un mes de la transferencia, y se generalizó a lo largo de todo el elemento. Aparentemente la causa de que no se aprecie la fisuración en las medidas de la deformación, es no haber trasladado el prisma tras su fabricación, hasta varios meses desde la transferencia. De hecho, nada en el análisis de los datos proporcionados por la extensometría mecánica hace suponer la fisuración: la longitud de transmisión no supera el metro de longitud según los dos modelos empleados.

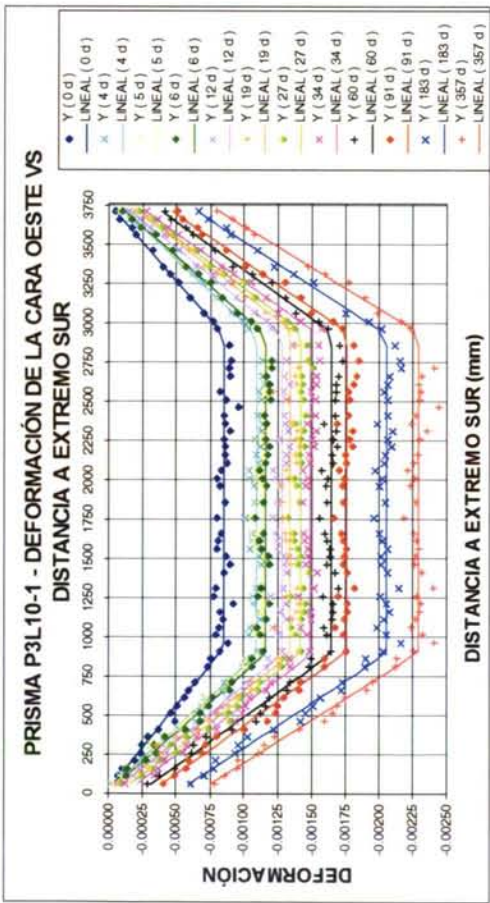
Como conclusión de esto, se aprecia que el estado tensional que sufra la viga inmediatamente después de la transferencia influye en el valor de la longitud de transmisión. En este caso, a pesar de la ausencia de armadura de confinamiento, la longitud de transmisión se mantiene acotada.



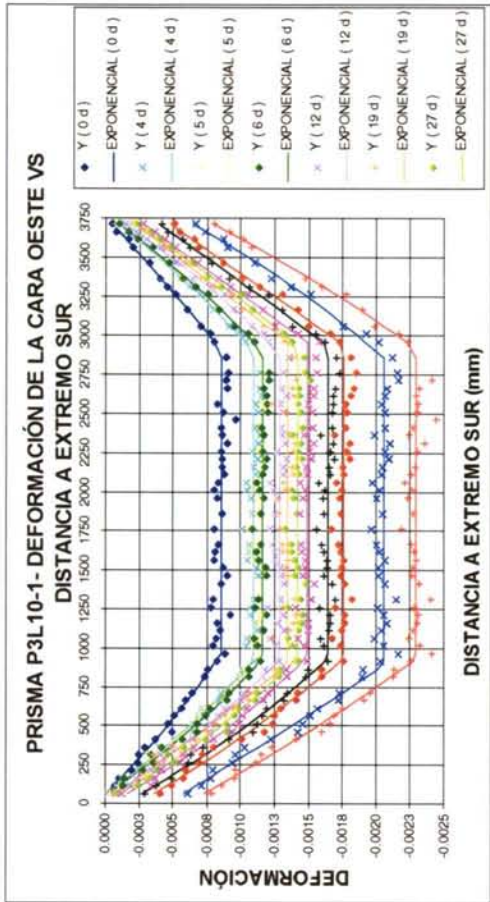
Gráfica 8.3.4.1



Gráfica 8.3.4.2



Gráfica 8.3.4.3



Gráfica 8.3.4.4



Tabla 8.3.4-1

Cara Este	P3L10-1									
	Def transferencia (0 días)		Def 4 días		Def 5 días		Def 6 días			
	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal
L = 3769 mm										
LT1 =	893	955	934	953	951	947	961	961		961
LT2 =	966	895	975	941	982	939	961	921		921
M =	-0.000812	-0.000811	-0.001104	-0.001103	-0.001140	-0.001139	-0.001170	-0.001169		-0.001169
m1 =	0.000023	0.000071	0.000033	0.000055	0.000064	0.000057	0.000045	0.000051		0.000051
m2 =	0.000024	-0.000032	-0.000032	-0.000065	-0.000033	-0.000082	-0.000018	-0.000073		-0.000073
R <sup>2</sup> =	0.986924	0.984956	0.982327	0.981853	0.986348	0.985490	0.986901	0.986323		0.986323
R <sup>2</sup> Lt1	0.995477	0.990768	0.988408	0.987525	0.990101	0.990064	0.986320	0.986277		0.986277
R <sup>2</sup> Lt2	0.986613	0.978457	0.976527	0.972178	0.993548	0.990116	0.992079	0.989275		0.989275
ERR.CUAD. =	0.537367	0.618255	1.287049	1.321568	0.890821	0.946801	0.879121	0.917952		0.917952
	Def 12 días		Def 19 días		Def 27 días		Def 34 días			
	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal
LT1 =	986	955	1309	966	955	954	968	940		940
LT2 =	971	928	883	849	938	925	961	906		906
M =	-0.001275	-0.001273	-0.001405	-0.001387	-0.001403	-0.001403	-0.001480	-0.001476		-0.001476
m1 =	0.000123	0.000049	0.000228	0.000008	-0.000050	-0.000057	-0.000041	-0.000092		-0.000092
m2 =	-0.000039	-0.000083	-0.000117	-0.000149	-0.000134	-0.000159	-0.000183	-0.000229		-0.000229
R <sup>2</sup> =	0.984654	0.983871	0.981235	0.974565	0.977373	0.977263	0.979144	0.978598		0.978598
R <sup>2</sup> Lt1	0.981132	0.978802	0.973768	0.965934	0.961520	0.961471	0.957385	0.956208		0.956208
R <sup>2</sup> Lt2	0.995009	0.994485	0.988676	0.985837	0.994047	0.993591	0.994391	0.995262		0.995262
ERR.CUAD. =	1.206792	1.268426	1.576635	2.137086	1.912635	1.921886	1.771636	1.818033		1.818033
	Def 60 días		Def 91 días		Def 163 días		Def 356 días			
	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal
LT1 =	985	952	941	932	939	943	992	870		870
LT2 =	917	924	885	922	883	927	921	889		889
M =	-0.001644	-0.001644	-0.001761	-0.001763	-0.002066	-0.002068	-0.002328	-0.002321		-0.002321
m1 =	-0.000133	-0.000196	-0.000256	-0.000283	-0.000474	-0.000471	-0.000103	-0.000475		-0.000475
m2 =	-0.000335	-0.000319	-0.000463	-0.000423	-0.000694	-0.000635	-0.000741	-0.000757		-0.000757
R <sup>2</sup> =	0.978209	0.977909	0.973877	0.973522	0.980253	0.979776	0.981529	0.980585		0.980585
R <sup>2</sup> Lt1	0.961273	0.959661	0.952374	0.952071	0.969531	0.969535	0.977636	0.977545		0.977545
R <sup>2</sup> Lt2	0.992795	0.992607	0.991700	0.989465	0.990580	0.987095	0.985324	0.987335		0.987335
ERR.CUAD. =	2.101987	2.130975	2.612166	2.647660	2.214046	2.267485	2.063914	2.169404		2.169404

Tabla 8.3.4-2

Cara Oeste	P3L10-1									
	Def transferencia (0 días)		Def 4 días		Def 5 días		Def 6 días			
	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal
L = 3769 mm										
LT1 =	960	936	916	882	935	902	923	887		
LT2 =	862	854	860	845	843	827	865	845		
M =	-0.000850	-0.000850	-0.001088	-0.001089	-0.001133	-0.001132	-0.001155	-0.001154		
m1 =	0.000059	0.000018	0.000088	0.000037	0.000078	0.000029	0.000080	0.000015		
m2 =	0.000019	0.000010	-0.000013	-0.000033	-0.000005	-0.000032	-0.000011	-0.000040		
R <sup>2</sup> =	0.983937	0.983415	0.991374	0.990432	0.988556	0.987702	0.992136	0.991302		
R <sup>2</sup> Lt1	0.989905	0.987339	0.990330	0.984703	0.987378	0.981385	0.987429	0.981856		
R <sup>2</sup> Lt2	0.997898	0.997709	0.997769	0.997086	0.992653	0.991725	0.997645	0.996505		
ERR.CUAD. =	0.692105	0.714609	0.593934	0.658735	0.874181	0.939444	0.547767	0.605890		
	Def 12 días		Def 19 días		Def 27 días		Def 34 días			
	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal
LT1 =	915	888	893	884	933	893	943	879		
LT2 =	881	846	806	818	835	825	810	810		
M =	-0.001279	-0.001280	-0.001345	-0.001345	-0.001418	-0.001418	-0.001489	-0.001487		
m1 =	0.000032	-0.000023	0.000008	-0.000008	0.000002	-0.000075	-0.000038	-0.000120		
m2 =	-0.000038	-0.000080	-0.000134	-0.000123	-0.000127	-0.000146	-0.000182	-0.000177		
R <sup>2</sup> =	0.991048	0.989962	0.986209	0.986149	0.990758	0.989458	0.991338	0.989370		
R <sup>2</sup> Lt1	0.990835	0.984758	0.981783	0.981480	0.987011	0.978421	0.988946	0.978007		
R <sup>2</sup> Lt2	0.995502	0.994097	0.992871	0.994058	0.995117	0.994644	0.994144	0.992546		
ERR.CUAD. =	0.815929	0.914944	1.263448	1.269001	0.954207	1.088450	0.911597	1.118748		
	Def 60 días		Def 91 días		Def 163 días		Def 357 días			
	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal	Exponencial	Líneal
LT1 =	930	892	927	901	886	893	926	899		
LT2 =	830	829	826	829	910	846	852	833		
M =	-0.001641	-0.001641	-0.001755	-0.001755	-0.002055	-0.002054	-0.002293	-0.002292		
m1 =	-0.000149	-0.000221	-0.000251	-0.000304	-0.000462	-0.000489	-0.000608	-0.000646		
m2 =	-0.000298	-0.000299	-0.000374	-0.000369	-0.000511	-0.000546	-0.000660	-0.000702		
R <sup>2</sup> =	0.989718	0.988667	0.988632	0.988075	0.988009	0.988931	0.989454	0.989013		
R <sup>2</sup> Lt1	0.983700	0.975361	0.981584	0.974957	0.981530	0.980727	0.988224	0.985385		
R <sup>2</sup> Lt2	0.992273	0.992269	0.991416	0.991394	0.992116	0.993837	0.994655	0.993451		
ERR.CUAD. =	1.125505	1.240546	1.388324	1.456362	1.744737	1.610535	1.630040	1.698205		



### 8.3.5. Prisma P1L3-1

La deformación de la zona central tras la transferencia fue de  $-8.94\text{E-}4$  en la cara Este y de  $-7.68\text{E-}4$  en la cara Oeste (Tabla 8.3.5-1). El valor medio es de  $-8.32\text{E-}4$ . Se aprecia una diferencia notable entre la deformación central de ambas caras, lo que puede estar motivado por una excentricidad accidental de la fuerza de pretensado.

Este prisma fisuró en el extremo Norte, por estallido/hendimiento durante la transferencia. Aparte, apareció una fisura de hendimiento en la cara Oeste, en el Sur y en el Norte, fisuras detectadas a los 46 días de la transferencia. Esto se aprecia claramente en las Gráficas 8.3.5-1 a 8.3.5-4.

Se aprecia un cambio de comportamiento entre los 28 días y los dos meses posteriores a la transferencia, produciéndose un aumento de la longitud de transmisión del extremo Sur de 600 mm y de 2000 mm en las caras Este y Oeste respectivamente.

El ajuste exponencial presenta un valor del coeficiente  $R^2$  global ligeramente superior al lineal, al igual que sucedía con los prismas de HL10-1.

Para este material se pone de manifiesto el fenómeno de fisuración diferida por hendimiento.

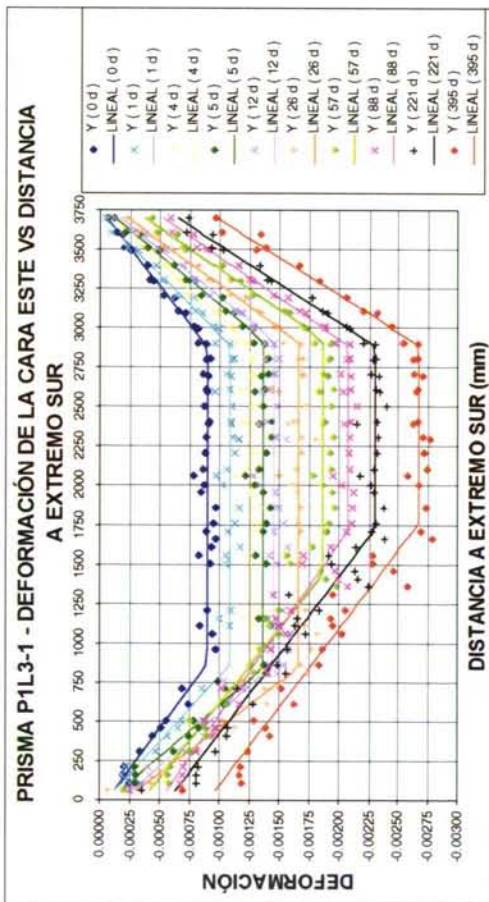
### 8.3.6. Prisma P2L3-1

La deformación de la zona central durante la transferencia es de  $-8.01\text{E-}4$  en la cara Este y de  $-7.83\text{E-}4$  en la cara Oeste, lo que proporciona una media de  $-7.9\text{E-}4$  (Tabla 8.3.6-1). Este valor es inferior a la deformación experimentada en el prisma anterior de HL3-1, y de los prismas de HL10-1, lo que parece razonable, dado que este material tiene un módulo de deformación superior al del HL10-1.

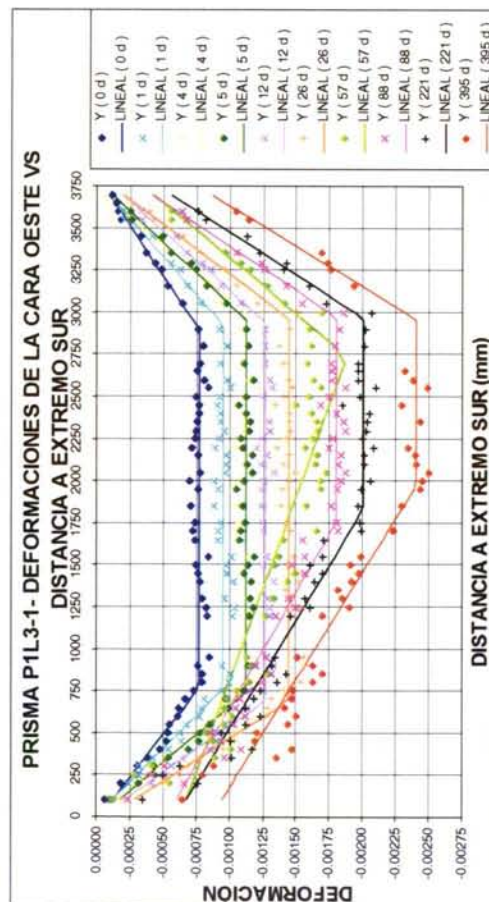
La fisuración se detecta entre los 14 y 27 días tras la transferencia. La fisuración se aprecia claramente en las Gráficas 8.3.6-1 a 8.3.6-4.

En la cara Este, se observa fisuración progresiva desde ambos extremos a la misma edad. La fisuración progresa con el tiempo, siendo más acusada en el extremo Sur. En la cara Oeste, se observa el mismo proceso. Al cabo de varios meses desaparece la zona central en el ajuste exponencial, lo que indica fisuración generalizada, acompañada de pérdida generalizada de fuerza de pretensado a lo largo de todo el prisma.

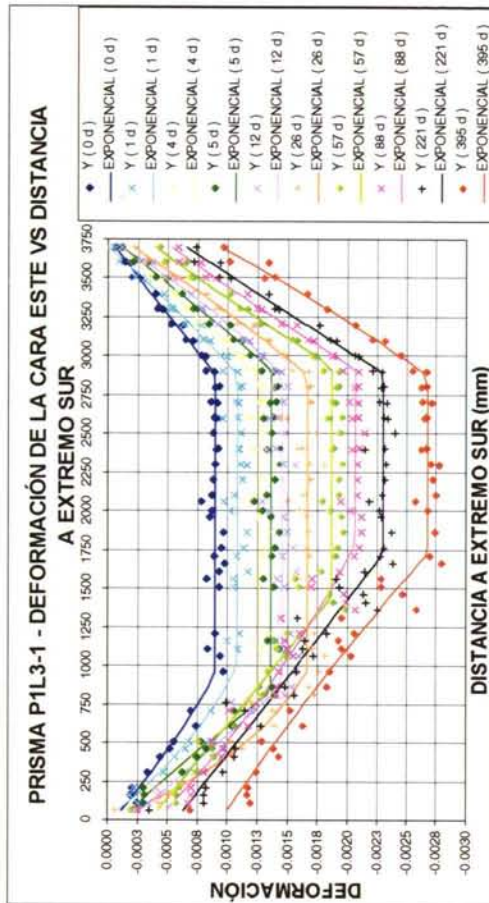
El valor del coeficiente  $R^2$  es superior en el modelo exponencial que en el lineal, hasta que se produce la fisuración generalizada.



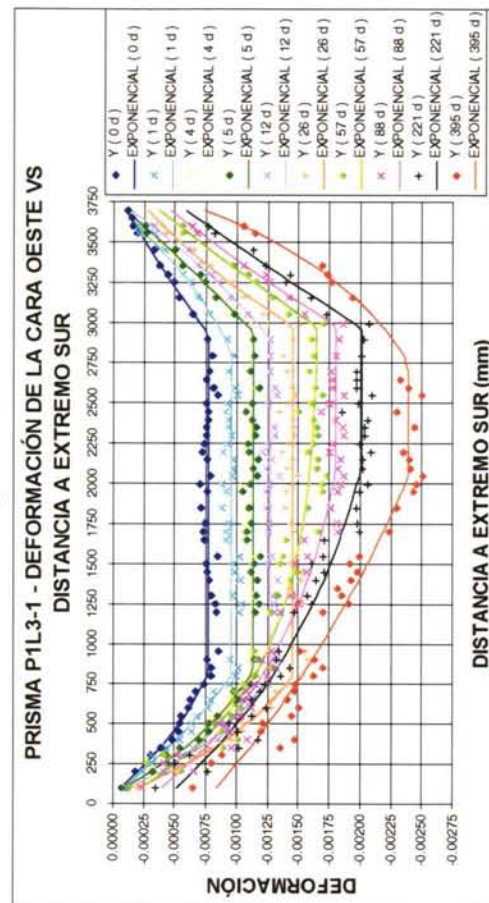
Gráfica 8.3.5-1



Gráfica 8.3.5-3



Gráfica 8.3.5-2



Gráfica 8.3.5-4

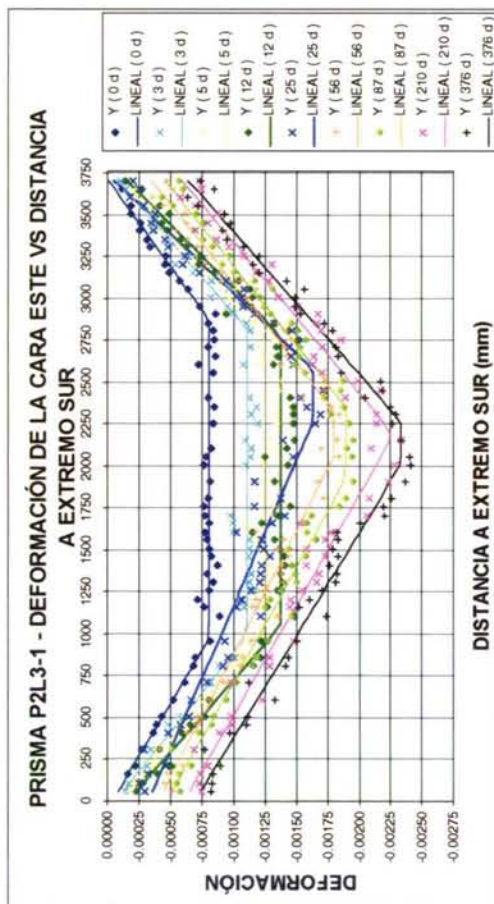


Tabla 8.3.5-1

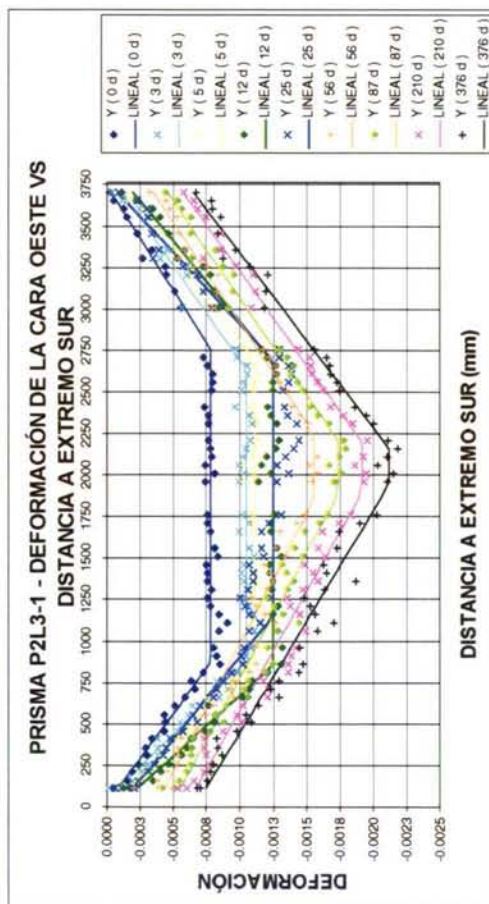
Cara Este	PIL3-1											
	Def 26 días			Def 57 días			Def 86 días			Def 221 días		
	Exponencial	Líneal		Exponencial	Líneal		Exponencial	Líneal		Exponencial	Líneal	
L = 3752 mm												
L <sub>T1</sub> =	931	867		997	858		809	809		829	838	
L <sub>T2</sub> =	871	874		877	859		892	881		838	832	
M =	-0.000894	-0.000894		-0.001075	-0.001075		-0.001262	-0.001262		-0.001357	-0.001357	
m <sub>1</sub> =	-0.000049	-0.000063		0.000011	-0.000056		-0.000099	-0.000120		-0.000101	-0.000079	
m <sub>2</sub> =	0.000000	0.000003		0.000090	0.000049		0.000004	-0.000022		-0.000023	-0.000033	
R <sup>2</sup> =	0.975509	0.975871		0.976009	0.975189		0.979000	0.978779		0.981631	0.981560	
R <sup>2</sup> L <sub>L1</sub>	0.929554	0.932737		0.950879	0.947473		0.954802	0.953489		0.961624	0.961277	
R <sup>2</sup> L <sub>L2</sub>	0.984387	0.984390		0.979010	0.977188		0.987539	0.986983		0.983320	0.983238	
ERR.CUAD. =	0.920643	0.907034		1.242728	1.285176		1.476936	1.492473		1.465981	1.471667	
	Def 26 días			Def 57 días			Def 86 días			Def 221 días		
L <sub>T1</sub> =	956	839		1438	1437		1792	1709		1728	1721	
L <sub>T2</sub> =	876	843		816	829		836	862		862	863	
M =	-0.001659	-0.001656		-0.001861	-0.001861		-0.002065	-0.002072		-0.002297	-0.002297	
m <sub>1</sub> =	-0.000005	-0.000210		-0.000354	-0.000352		-0.000413	-0.000504		-0.000569	-0.000577	
m <sub>2</sub> =	-0.000091	-0.000122		-0.000290	-0.000262		-0.000430	-0.000415		-0.000538	-0.000531	
R <sup>2</sup> =	0.964699	0.959749		0.966865	0.966783		0.965366	0.963212		0.960283	0.960263	
R <sup>2</sup> L <sub>L1</sub>	0.934832	0.899358		0.946685	0.946681		0.927498	0.914642		0.916140	0.916101	
R <sup>2</sup> L <sub>L2</sub>	0.988328	0.988315		0.987384	0.986909		0.986026	0.987417		0.984623	0.984603	
ERR.CUAD. =	4.416152	5.035425		4.941163	4.953420		5.652366	6.003863		7.637341	7.641311	
	Def 26 días			Def 57 días			Def 86 días			Def 221 días		
L <sub>T1</sub> =	876	839		1438	1437		1792	1709		1728	1721	
L <sub>T2</sub> =	876	843		816	829		836	862		862	863	
M =	-0.001659	-0.001656		-0.001861	-0.001861		-0.002065	-0.002072		-0.002297	-0.002297	
m <sub>1</sub> =	-0.000005	-0.000210		-0.000354	-0.000352		-0.000413	-0.000504		-0.000569	-0.000577	
m <sub>2</sub> =	-0.000091	-0.000122		-0.000290	-0.000262		-0.000430	-0.000415		-0.000538	-0.000531	
R <sup>2</sup> =	0.964699	0.959749		0.966865	0.966783		0.965366	0.963212		0.960283	0.960263	
R <sup>2</sup> L <sub>L1</sub>	0.934832	0.899358		0.946685	0.946681		0.927498	0.914642		0.916140	0.916101	
R <sup>2</sup> L <sub>L2</sub>	0.988328	0.988315		0.987384	0.986909		0.986026	0.987417		0.984623	0.984603	
ERR.CUAD. =	4.416152	5.035425		4.941163	4.953420		5.652366	6.003863		7.637341	7.641311	

Tabla 8.3.5-2

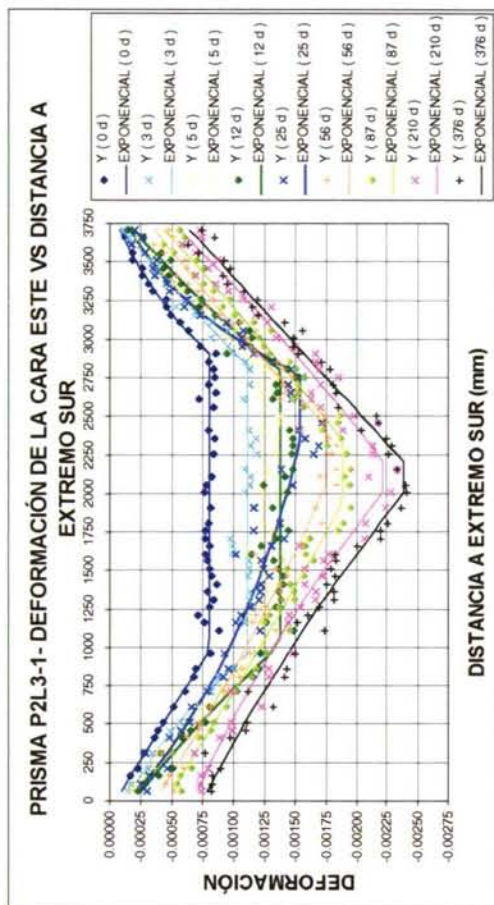
Cara Oeste	PIL3-1											
	Def 26 días			Def 57 días			Def 86 días			Def 227 días		
	Exponencial	Líneal		Exponencial	Líneal		Exponencial	Líneal		Exponencial	Líneal	
L = 3752 mm												
L <sub>T1</sub> =	828	767		798	766		794	758		825	739	
L <sub>T2</sub> =	835	863		944	836		759	759		813	802	
M =	-0.000768	-0.000769		-0.000952	-0.000951		-0.001120	-0.001120		-0.001125	-0.001124	
m <sub>1</sub> =	0.000106	-0.000026		0.000076	0.000005		0.000027	-0.000075		0.000155	-0.000022	
m <sub>2</sub> =	-0.000051	-0.000045		0.000084	-0.000029		0.000091	0.000052		0.000033	-0.000039	
R <sup>2</sup> =	0.977583	0.973724		0.976297	0.973754		0.962372	0.960658		0.986356	0.982931	
R <sup>2</sup> L <sub>L1</sub>	0.984442	0.960392		0.982314	0.978181		0.986337	0.978846		0.985473	0.964880	
R <sup>2</sup> L <sub>L2</sub>	0.988187	0.992118		0.990450	0.973098		0.992963	0.922739		0.983861	0.981426	
ERR.CUAD. =	0.600984	0.704439		0.787987	0.872517		1.560188	1.631268		0.585187	0.732095	
	Def 26 días			Def 57 días			Def 86 días			Def 227 días		
L <sub>T1</sub> =	800	692		2770	2698		2049	1747		2096	1827	
L <sub>T2</sub> =	773	794		776	1009		768	783		780	787	
M =	-0.001452	-0.001447		-0.001644	-0.001863		-0.001796	-0.001801		-0.002007	-0.002007	
m <sub>1</sub> =	0.000128	-0.000100		-0.000013	-0.000630		-0.000224	-0.000530		-0.000364	-0.000597	
m <sub>2</sub> =	-0.000212	-0.000108		-0.000275	-0.000348		-0.000369	-0.000309		-0.000487	-0.000453	
R <sup>2</sup> =	0.978602	0.971981		0.944248	0.832190		0.957111	0.938109		0.960951	0.950665	
R <sup>2</sup> L <sub>L1</sub>	0.991532	0.973019		0.935048	0.806786		0.932988	0.862423		0.940397	0.890119	
R <sup>2</sup> L <sub>L2</sub>	0.976030	0.971833		0.980532	0.941629		0.979817	0.978554		0.970508	0.970207	
ERR.CUAD. =	1.355994	1.775569		4.738631	14.262823		4.319947	6.233996		4.701486	5.940023	
	Def 26 días			Def 57 días			Def 86 días			Def 227 días		
L <sub>T1</sub> =	800	692		2770	2698		2049	1747		2096	1827	
L <sub>T2</sub> =	773	794		776	1009		768	783		780	787	
M =	-0.001452	-0.001447		-0.001644	-0.001863		-0.001796	-0.001801		-0.002007	-0.002007	
m <sub>1</sub> =	0.000128	-0.000100		-0.000013	-0.000630		-0.000224	-0.000530		-0.000364	-0.000597	
m <sub>2</sub> =	-0.000212	-0.000108		-0.000275	-0.000348		-0.000369	-0.000309		-0.000487	-0.000453	
R <sup>2</sup> =	0.978602	0.971981		0.944248	0.832190		0.957111	0.938109		0.960951	0.950665	
R <sup>2</sup> L <sub>L1</sub>	0.991532	0.973019		0.935048	0.806786		0.932988	0.862423		0.940397	0.890119	
R <sup>2</sup> L <sub>L2</sub>	0.976030	0.971833		0.980532	0.941629		0.979817	0.978554		0.970508	0.970207	
ERR.CUAD. =	1.355994	1.775569		4.738631	14.262823		4.319947	6.233996		4.701486	5.940023	



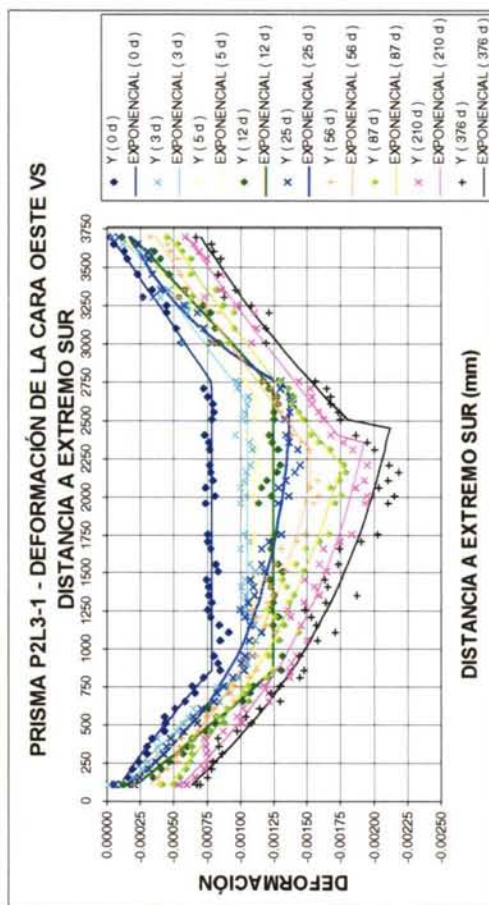
Gráfica 8.3.6-1



Gráfica 8.3.6-3



Gráfica 8.3.6-2



Gráfica 8.3.6-4



Tabla 8.3.6-1

Cara Este	P2L3-1									
	Def transfrancia (0 días)		Def 3 días		Def 5 días		Def 12 días		Def 25 días	
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
L = 3761 mm										
LT1 =	979	971	942	991	1035	1051	1019	1050	2327	2263
LT2 =	854	890	929	946	962	990	962	987	982	1185
M =	-0.000802	-0.000800	-0.001104	-0.001102	-0.001245	-0.001245	-0.001370	-0.001371	-0.001530	-0.001623
m1 =	-0.000046	-0.000036	-0.000126	-0.000061	-0.000106	-0.000094	-0.000186	-0.000161	-0.000168	-0.000319
m2 =	-0.000050	0.000047	-0.000039	-0.000013	-0.000085	-0.000043	-0.000120	-0.000077	-0.000122	0.000025
R <sup>2</sup> =	0.981196	0.976938	0.979089	0.976544	0.972700	0.972064	0.959889	0.959400	0.962258	0.943313
R <sup>2</sup> Lt1	0.996290	0.996024	0.988408	0.975578	0.989517	0.989188	0.972019	0.971076	0.936269	0.904770
R <sup>2</sup> Lt2	0.987125	0.967863	0.973482	0.972492	0.972804	0.970312	0.940463	0.938631	0.976267	0.958350
ERR.CUAD. =	0.546024	0.669685	1.384372	1.552820	2.432308	2.489026	3.872742	3.929784	4.543576	6.824296
	Def 56 días		Def 87 días		Def 210 días		Def 376 días			
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal		
LT1 =	2052.681188	2052.651426	1947.691340	1926.743242	2006.226475	2153.219693	1998.533822	2009.720068		
LT2 =	1325.174715	1427.945811	1426.055633	1409.696063	1560.130394	1547.183765	1552.268491	1497.084280		
M =	-0.001747	-0.001793	-0.001886	-0.001885	-0.002215	-0.002243	-0.002381	-0.002330		
m1 =	-0.000362	-0.000402	-0.000453	-0.000468	-0.000672	-0.000606	-0.000745	-0.000686		
m2 =	-0.000301	-0.000287	-0.000371	-0.000392	-0.000484	-0.000526	-0.000577	-0.000573		
R <sup>2</sup> =	0.958385	0.958472	0.968032	0.967791	0.945267	0.943048	0.972258	0.970758		
R <sup>2</sup> Lt1	0.938552	0.935715	0.964694	0.964476	0.941931	0.945067	0.961935	0.962632		
R <sup>2</sup> Lt2	0.960459	0.958864	0.962120	0.961756	0.941392	0.940130	0.973025	0.971042		
ERR.CUAD. =	4.847136	4.837018	4.098976	4.129828	7.793463	8.109517	4.490899	4.733753		

Tabla 8.3.6-2

Cara Oeste	P2L3-1									
	Def transfrancia (0 días)		Def 3 días		Def 5 días		Def 12 días		Def 25 días	
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
L = 3761 mm										
LT1 =	858	872	870	883	894	880	858	853	2333	1144
LT2 =	1012	1008	1138	1126	1115	1076	1057	1084	1055	1069
M =	-0.000783	-0.000782	-0.001045	-0.001045	-0.001111	-0.001111	-0.001241	-0.001246	-0.001355	-0.001244
m1 =	-0.000014	0.000022	0.000037	0.000055	0.000008	-0.000010	-0.000041	-0.000077	0.000031	-0.000083
m2 =	0.000027	0.000021	-0.000043	-0.000056	-0.000046	-0.000090	-0.000112	-0.000135	-0.000132	-0.000009
R <sup>2</sup> =	0.980626	0.979919	0.977326	0.977196	0.986696	0.985886	0.983021	0.982958	0.980142	0.937855
R <sup>2</sup> Lt1	0.979841	0.975920	0.965036	0.964705	0.977959	0.977653	0.968352	0.966664	0.973716	0.977163
R <sup>2</sup> Lt2	0.965947	0.965343	0.955936	0.955584	0.988361	0.980960	0.976120	0.974996	0.971213	0.942263
ERR.CUAD. =	0.769933	0.798049	1.517519	1.526231	0.849540	0.901264	1.337888	1.342881	1.976750	6.186181
	Def 56 días		Def 87 días		Def 210 días		Def 376 días			
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal		
LT1 =	2107	1841	2220	1875	2406	1887	2492	1941		
LT2 =	1462	1516	1565	1555	1568	1565	1522	1604		
M =	-0.001525	-0.001555	-0.001759	-0.001735	-0.001936	-0.001917	-0.002127	-0.002119		
m1 =	-0.000179	-0.000365	-0.000339	-0.000479	-0.000415	-0.000593	-0.000486	-0.000661		
m2 =	-0.000317	-0.000298	-0.000418	-0.000401	-0.000546	-0.000519	-0.000660	-0.000597		
R <sup>2</sup> =	0.971360	0.953425	0.973133	0.962627	0.966355	0.959663	0.962697	0.967239		
R <sup>2</sup> Lt1	0.966707	0.962662	0.929955	0.925955	0.962098	0.925447	0.955512	0.936544		
R <sup>2</sup> Lt2	0.978352	0.977884	0.981131	0.980606	0.974364	0.980120	0.971844	0.984562		
ERR.CUAD. =	2.321032	3.774547	2.583517	3.593741	3.411334	4.089801	4.503448	3.955122		

### 8.3.7. Prisma P3L3-1

La deformación del hormigón tras la transferencia en la zona central es de  $-8.05E-4$  en la cara Este y de  $-8.65E-4$  en la cara Oeste. La media es de  $-8.3E-4$  en ambas caras (véase la Tabla 8.3.7-1).

Este prisma también presentó fisuración por hendimiento en ambos extremos, detectada a los doce días de la transferencia. En las gráficas siguientes (8.3.7-1 a 8.3.7-4) se aprecia un cambio de comportamiento entre los 7 y los 12 días, tiempo en el que se produce un aumento generalizado de la zona de transmisión en ambos extremos. Según el modelo exponencial, a los doce días desaparece la zona central, lo que indica pérdidas generalizadas de pretensado a lo largo de todo el prisma. Dado que no se impuso la restricción de que

$$L_{t1} \leq L_{prisma} - L_{t2}$$

donde  $L_{prisma}$  es la longitud total del prisma, aparecen resultados no concordantes: aparecen longitudes de transmisión que cumplen que

$$L_{t1} + L_{t2} > L_{prisma}$$

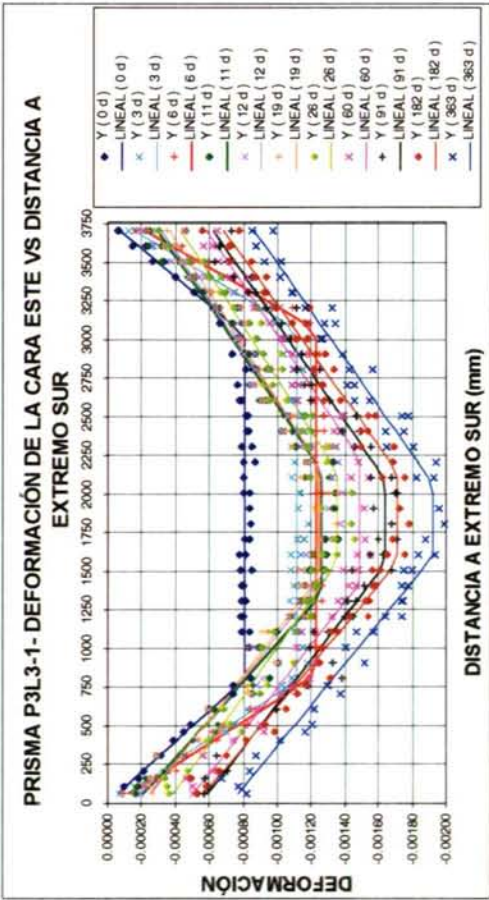
Realmente creemos conveniente no imponer la restricción, sino imponer un parámetro de control que “avise” cuando se produzca esta situación: cuando esto suceda hablaremos de longitudes de transmisión divergentes, puesto que la zona de transmisión abarca toda la viga. En caso de que esto suceda, se producirán pérdidas de pretensado generalizadas a toda la viga, aparte de las pérdidas que se producen bajo la condición de adherencia perfecta (EHE98, Art. 20).

El modelo lineal proporciona aparentemente una zona central sin tensiones de adherencia, hasta la última medida incluida, correspondiente al año tras la transferencia. Por esto, el análisis del modelo exponencial es más desfavorable.

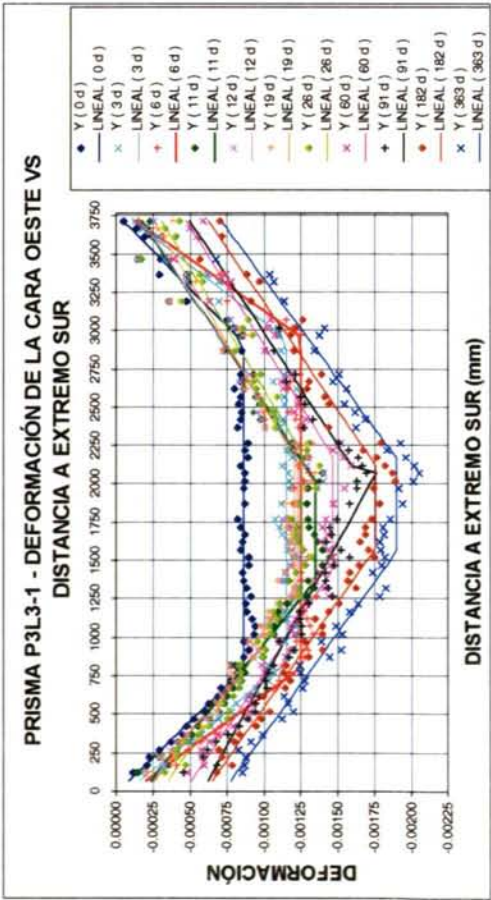
La pendiente proporcionada por el modelo lineal tras la fisuración es sensiblemente constante para las diferentes medidas, lo que parece indicar un valor para la adherencia residual.

Al igual que en el resto de los prismas de HL10-1 y de HL3-1, el valor del coeficiente  $R^2$  es superior en el modelo exponencial.

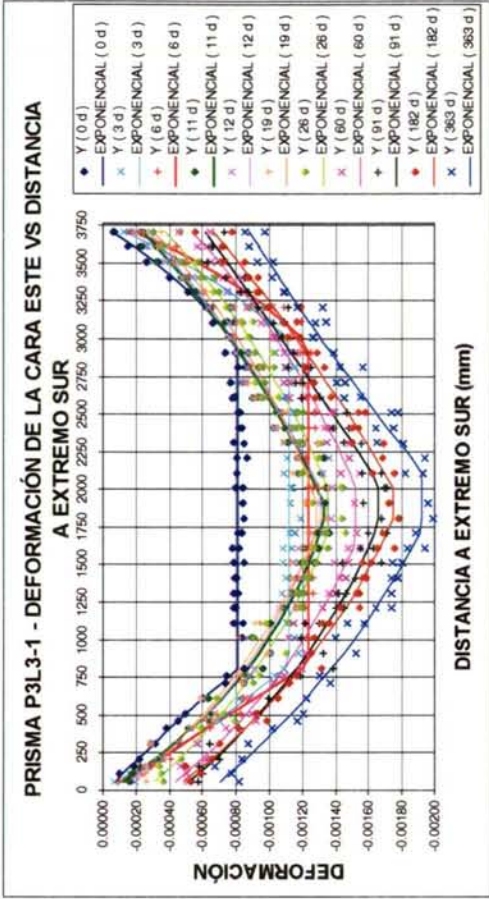




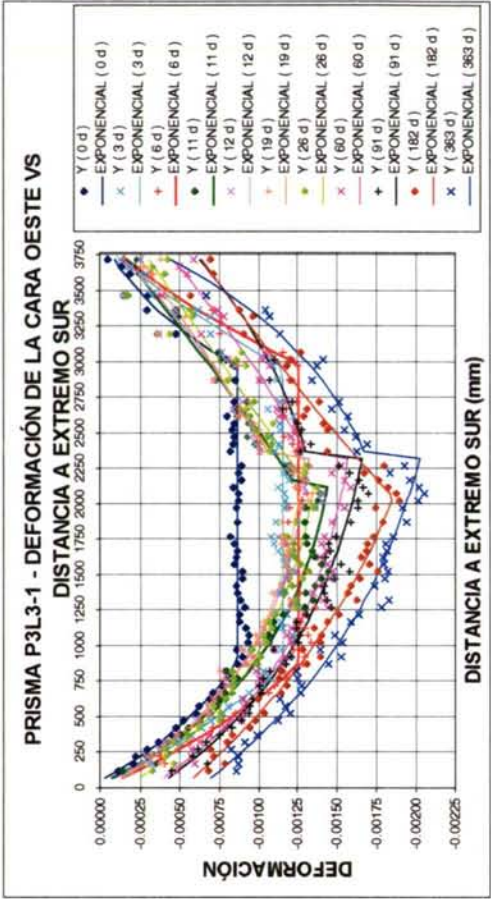
Gráfica 8.3.7-1



Gráfica 8.3.7-3



Gráfica 8.3.7-2



Gráfica 8.3.7-4





Tabla 8.3.7-2

Cara Oeste	P3L3-1											
	Def transferencia (0 días)		Def 3 días		Def 6 días		Def 11 días					
	Exponencial (trans)	Lineal (trans)	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
L = 3771 mm												
L <sup>T</sup> 1 =	902	796	887	840	873	803	2168	1366				
L <sup>T</sup> 2 =	800	856	816	834	785	815	1974	1754				
M =	-0.000866	-0.000863	-0.001152	-0.001152	-0.001253	-0.001250	-0.001449	-0.001348				
m1 =	0.000091	-0.000014	0.000038	-0.000069	0.000000	-0.000103	0.000047	-0.000171				
m2 =	-0.000057	0.000016	-0.000061	-0.000028	-0.000100	-0.000042	-0.000124	-0.000127				
R <sup>2</sup> =	0.983702	0.978925	0.981106	0.979301	0.976277	0.973499	0.960575	0.966958				
R <sup>2</sup> Lt1	0.992333	0.990620	0.992774	0.984041	0.989289	0.987849	0.967691	0.969339				
R <sup>2</sup> Lt2	0.961874	0.957162	0.970602	0.968707	0.959887	0.964729	0.950593	0.938060				
ERR.CUAD. =	0.616697	0.797448	1.184558	1.297736	1.660912	1.855396	3.343732	2.802396				
	Def 12 días		Def 19 días		Def 26 días		Def 60 días					
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
L <sup>T</sup> 1 =	2367.400546	1338.987706	2367.403324	1319.651311	2138.423604	1339.781662	2367.401440	1441.164302				
L <sup>T</sup> 2 =	2226.593558	1618.114243	1863.714806	1599.318117	1720.190511	1562.356675	2006.491863	1593.424959				
M =	-0.001325	-0.001231	-0.001297	-0.001205	-0.001357	-0.001255	-0.001574	-0.001467				
m1 =	0.000014	-0.000201	-0.000033	-0.000212	-0.000155	-0.000304	-0.000302	-0.000461				
m2 =	-0.000095	-0.000143	-0.000215	-0.000218	-0.000268	-0.000267	-0.000414	-0.000436				
R <sup>2</sup> =	0.955703	0.945609	0.951675	0.945388	0.939217	0.936881	0.956164	0.950446				
R <sup>2</sup> Lt1	0.965440	0.972276	0.973375	0.968308	0.968270	0.957991	0.974962	0.963783				
R <sup>2</sup> Lt2	0.945060	0.924066	0.931455	0.896092	0.898855	0.884423	0.942536	0.909338				
ERR.CUAD. =	2.933413	3.601897	2.990571	3.379665	3.452612	3.585265	2.707876	3.061085				
	Def 91 días		Def 182 días		Def 363 días							
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal						
L <sup>T</sup> 1 =	2367.364648	2117.557670	2007.263553	1585.806699	2367.364287	1555.245512						
L <sup>T</sup> 2 =	13034.364658	1933.815113	1712.718555	1653.433054	13034.364658	1603.282783						
M =	-0.001666	-0.001789	-0.001845	-0.001760	-0.002036	-0.001899						
m1 =	-0.000343	-0.000580	-0.000512	-0.000601	-0.000609	-0.000721						
m2 =	-0.000577	-0.000457	-0.000606	-0.000578	-0.000339	-0.000661						
R <sup>2</sup> =	0.968684	0.935514	0.962146	0.957974	0.962818	0.952504						
R <sup>2</sup> Lt1	0.970944	0.940143	0.976055	0.972945	0.966029	0.964160						
R <sup>2</sup> Lt2	--	0.903029	0.938655	0.920721	--	0.922263						
ERR.CUAD. =	1.529408	3.149414	2.843854	3.157286	2.581075	3.297058						

### 8.3.8. Prisma P3C

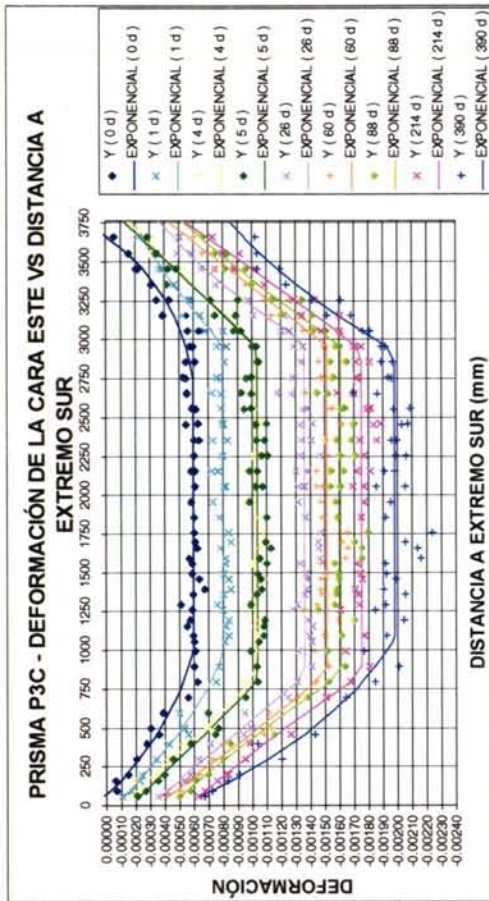
Aparte de los prismas fabricados, P3C y P4C, se fabricó previamente el prisma P2C fabricado. Los resultados de este prisma no se adjuntan, debido a que hubo un error en la dosificación de aditivo durante el amasado. A pesar de ello las propiedades del hormigón endurecido fueron muy similares a las del HC. Este prisma, debido a un proceso de transferencia un poco brusco presentó un inicio de fisuración por hendimiento. La fisura no progresó más de 80 mm desde el extremo Norte. Este hecho indica una característica diferencial del HC: la capacidad de frenar la propagación de fisuras, a pesar de la inexistencia de armadura de confinamiento. Esto creemos que se debe a la menor resistencia a tracción del árido ligero: el árido grueso convencional presenta una resistencia y rigidez elevadas, por lo que ejerce un efecto barrera sobre las fisuras. Este efecto no lo proporciona el árido ligero, considerablemente menos rígido que el mortero.

La deformación del prisma P3C en su zona central tras la transferencia fue de  $-5.92E-4$  en la cara Este y de  $-6.65E-4$  en la cara Oeste (véase la Tabla 8.3.8-1). La media resulta de  $-6.3E-4$ , valor que supone el 75% de la deformación experimentada en los prismas de hormigón ligero. Esto es debido al mayor módulo de deformación del hormigón convencional.

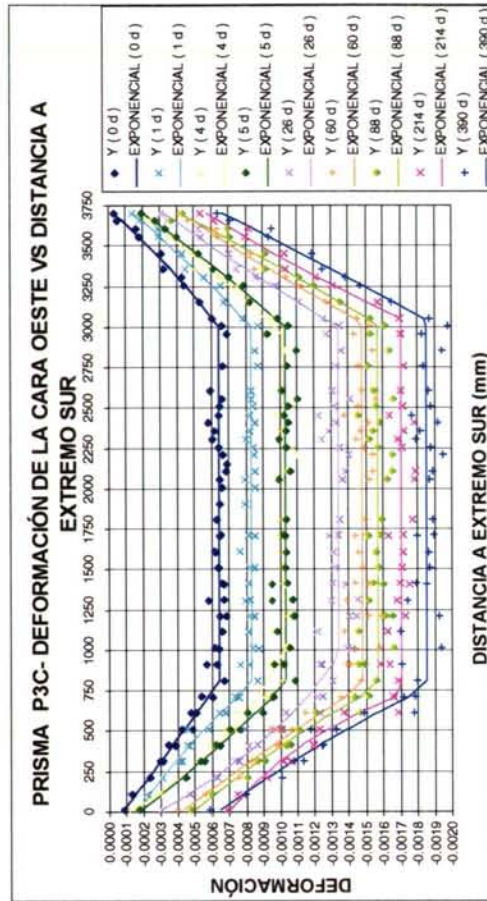
Este prisma no presentó fisuración alguna. En las Gráficas 8.3.8-1 a 8.3.8-4 se aprecia que:

- No predomina claramente ninguno de los ajustes, lineal o exponencial, atendiendo al valor del coeficiente  $R^2$ .
- La longitud de transmisión proporcionada por el ajuste lineal es más estable que la proporcionada por el exponencial.

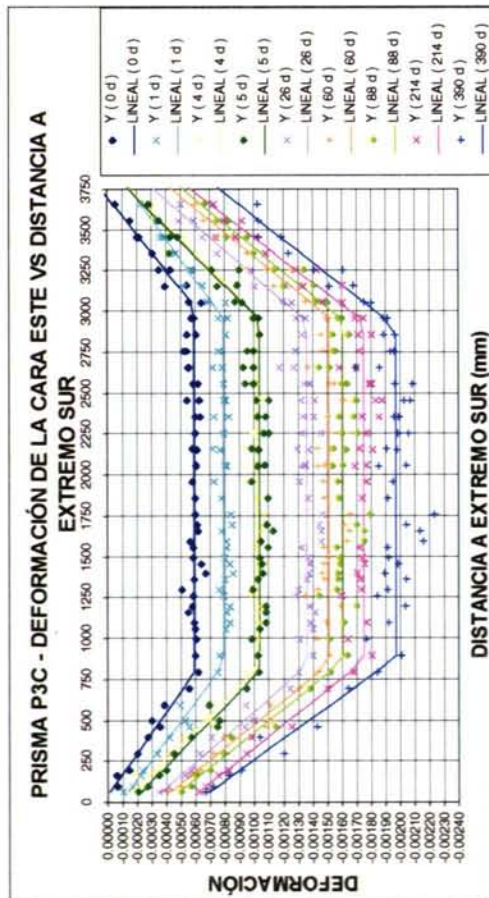




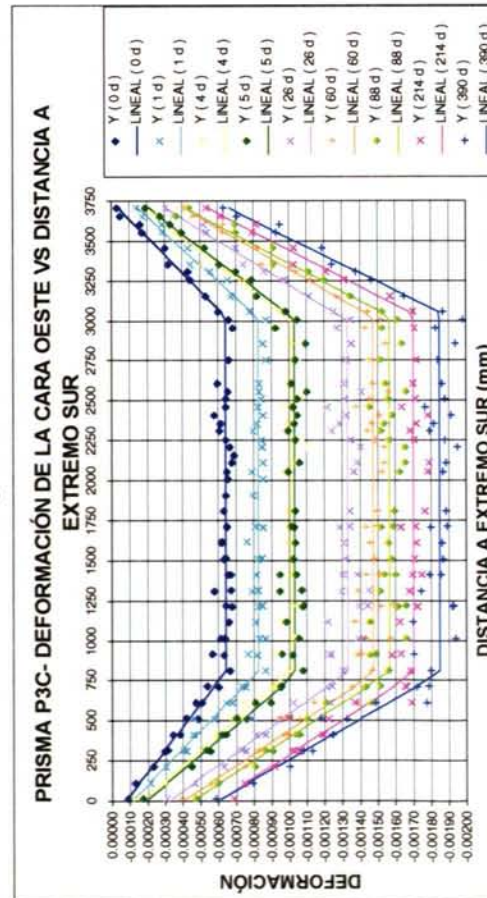
Gráfica 8.3.8-2



Gráfica 8.3.8-4



Gráfica 8.3.8-1



Gráfica 8.3.8-3

Tabla 8.3.8-1

Cara Este	P3C					
	Def transferencia (0 días)		Def 1 día		Def 4 días	
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
L = 3763 mm						
LT1 =	1000	793	941	843	836	816
LT2 =	1000	725	776	806	780	783
M =	-0.000596	-0.000588	-0.000792	-0.000791	-0.001020	-0.001020
m1 =	0.000093	0.000037	-0.000044	-0.000082	-0.000079	-0.000102
m2 =	0.000172	0.000056	-0.000177	-0.000141	-0.000144	-0.000137
R <sup>2</sup> =	0.931221	0.955420	0.966563	0.965368	0.950258	0.949970
R <sup>2</sup> Lt1	0.950773	0.951408	0.969726	0.954650	0.952870	0.951451
R <sup>2</sup> Lt2	0.913768	0.936509	0.926887	0.924526	0.831554	0.831499
ERR.CUAD. =	1.160454	0.752159	0.827720	0.857290	2.033401	2.045182
	Def 5 días		Def 26 días		Def 60 días	
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
LT1 =	809	800	834	832	854	840
LT2 =	822	816	768	822	806	796
M =	-0.001038	-0.001038	-0.001357	-0.001359	-0.001514	-0.001514
m1 =	-0.000151	-0.000161	-0.000292	-0.000286	-0.000330	-0.000343
m2 =	-0.000106	-0.000125	-0.000361	-0.000299	-0.000413	-0.000416
R <sup>2</sup> =	0.949824	0.949699	0.962458	0.962111	0.956100	0.956113
R <sup>2</sup> Lt1	0.962793	0.962505	0.964737	0.964622	0.972561	0.972355
R <sup>2</sup> Lt2	0.900619	0.900291	0.948464	0.958153	0.938263	0.938459
ERR.CUAD. =	2.007758	2.012780	2.301678	2.322967	3.068360	3.067441
	Def 88 días		Def 214 días		Def 390 días	
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
LT1 =	840	857	840	855	1068	879
LT2 =	802	819	826	821	834	859
M =	-0.001608	-0.001609	-0.001749	-0.001749	-0.001975	-0.001969
m1 =	-0.000424	-0.000402	-0.000552	-0.000530	-0.000494	-0.000594
m2 =	-0.000516	-0.000496	-0.000528	-0.000547	-0.000834	-0.000748
R <sup>2</sup> =	0.956044	0.955961	0.967325	0.967171	0.939815	0.940739
R <sup>2</sup> Lt1	0.976655	0.975806	0.982540	0.981796	0.944746	0.950282
R <sup>2</sup> Lt2	0.924137	0.947315	0.939523	0.939326	0.942199	0.936194
ERR.CUAD. =	3.228648	3.234730	2.436430	2.447926	5.486675	5.402494



Tabla 8.3.8-2

Cara Oeste	P3C					
	Def transferencia (0 días)		Def 1 día		Def 4 días	
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
L = 3763 mm						
L <sup>T1</sup> =	808	808	792	808	1006	813
L <sup>T2</sup> =	759	734	759	746	813	762
M =	-0.000639	-0.000640	-0.000827	-0.000826	-0.001021	-0.001012
m <sup>1</sup> =	-0.000069	-0.000076	-0.000157	-0.000107	-0.000115	-0.000177
m <sup>2</sup> =	0.000039	0.000013	-0.000070	-0.000089	-0.000108	-0.000114
R <sup>2</sup> =	0.976632	0.976055	0.979310	0.978466	0.976140	0.976423
R <sup>2</sup> Lt1	0.972698	0.972040	0.956984	0.962155	0.972939	0.977558
R <sup>2</sup> Lt2	0.987889	0.981808	0.977716	0.976117	0.976137	0.985973
ERR.CUAD. =	0.459545	0.470885	0.498536	0.518856	0.912078	0.901234
	Def 5 días		Def 26 días		Def 60 días	
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
L <sup>T1</sup> =	792	777	957	802	778	788
L <sup>T2</sup> =	759	748	759	762	728	744
M =	-0.001027	-0.001027	-0.001335	-0.001328	-0.001475	-0.001475
m <sup>1</sup> =	-0.000172	-0.000191	-0.000280	-0.000320	-0.000417	-0.000406
m <sup>2</sup> =	-0.000119	-0.000138	-0.000241	-0.000220	-0.000342	-0.000315
R <sup>2</sup> =	0.979558	0.979146	0.964516	0.965947	0.971116	0.970880
R <sup>2</sup> Lt1	0.984320	0.983040	0.934415	0.937383	0.942815	0.942560
R <sup>2</sup> Lt2	0.992825	0.991668	0.989804	0.989190	0.984624	0.983511
ERR.CUAD. =	0.700669	0.714811	2.082821	1.998865	1.833564	1.848516
	Def 88 días		Def 214 días		Def 390 días	
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
L <sup>T1</sup> =	775	801	726	789	768	794
L <sup>T2</sup> =	745	735	711	723	718	714
M =	-0.001567	-0.001567	-0.001701	-0.001701	-0.001849	-0.001849
m <sup>1</sup> =	-0.000485	-0.000453	-0.000699	-0.000602	-0.000630	-0.000593
m <sup>2</sup> =	-0.000299	-0.000316	-0.000483	-0.000444	-0.000547	-0.000556
R <sup>2</sup> =	0.966884	0.966457	0.961755	0.957563	0.964562	0.964120
R <sup>2</sup> Lt1	0.937261	0.935132	0.879750	0.860876	0.924211	0.922072
R <sup>2</sup> Lt2	0.965083	0.964744	0.977365	0.975129	0.984734	0.984641
ERR.CUAD. =	2.356960	2.387293	2.540402	2.818870	2.850468	2.885980

### 8.3.9. Prisma P4C

La deformación del hormigón en la zona central tras la transferencia es de  $-6.1\text{E}-4$  en la cara Este y de  $-5.92\text{E}-4$  en la cara Oeste, siendo la media de  $-6\text{E}-4$ , valor similar al del prisma anterior, P3C (Tabla 8.3.9-1).

No se apreció fisuración por hendimiento en este prisma.

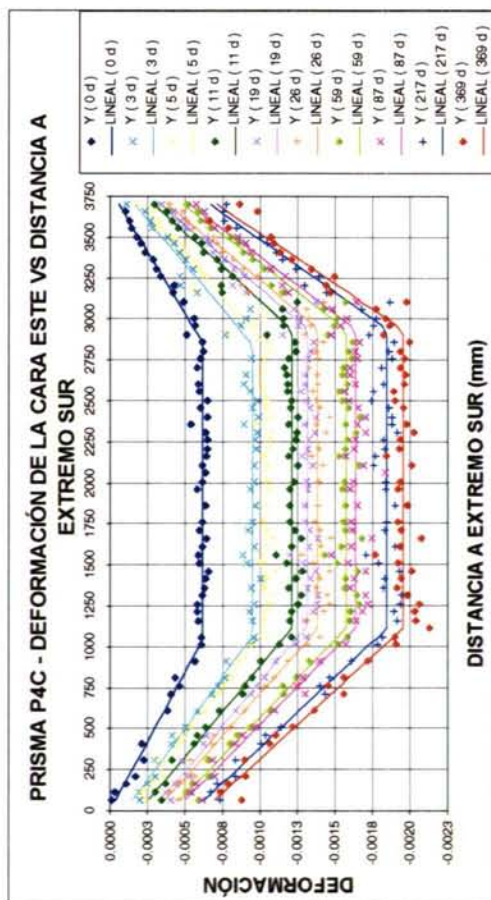
El ajuste exponencial presenta un valor del coeficiente  $R^2$  global superior al lineal en la mayor parte de las medidas, pero se aprecia que, si en una cara la curva resultante es convexa, en la cara opuesta tiende a ser cóncava. Esto puede estar motivado por una ligera incurvación del cordón de pretensado o de los costeros del molde, lo que introduce una excentricidad variable en el cordón. A pesar de que la norma EHE establece que una fuerza de 20 kN es suficiente para poder considerar el cordón de pretensado recto en bancada, puede que la curvatura resultante del suministro en bobina permanezca aún para valores de tracción superiores. Realmente, el recubrimiento de estos prismas, de 44.9 mm, es tan reducido que la ley de deformaciones del paramento acusa, no sólo el efecto helicoidal de arrollamiento de los alambres, sino también cualquier pequeña excentricidad.

Además de este efecto, se aprecia en las Gráficas 8.3.9-1 a 8.3.9-4 que en la zona de transmisión del extremo Sur la ley experimental de deformaciones del hormigón presenta un tramo convexo desde el extremo hasta un punto de inflexión, seguido de un tramo cóncavo. Es decir, una zona de tensiones de adherencia crecientes desde el extremo, hasta alcanzar un valor máximo (máximo gradiente en el punto de inflexión), seguido de una zona de tensiones de adherencia decrecientes. Esto puede estar motivado por el efecto Saint-Venant, es decir, puede afectar a la ley de deformaciones del paramento, pero no necesariamente a la ley de deformaciones del hormigón en contacto con el cordón.

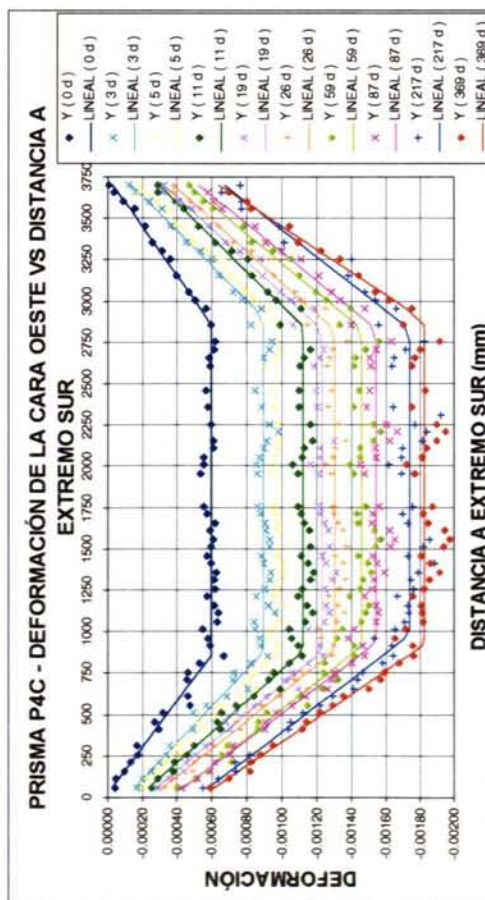
De todas formas, parece plausible que en el extremo, la zona más dañada por la transferencia, la tensión de adherencia sea reducida, y vaya aumentando según nos alejemos del extremo.

A continuación, en el Apartado 8.3.10 hacemos un resumen de las longitudes de transmisión a la edad de transferencia y al año de la misma, para cada tipo de material.

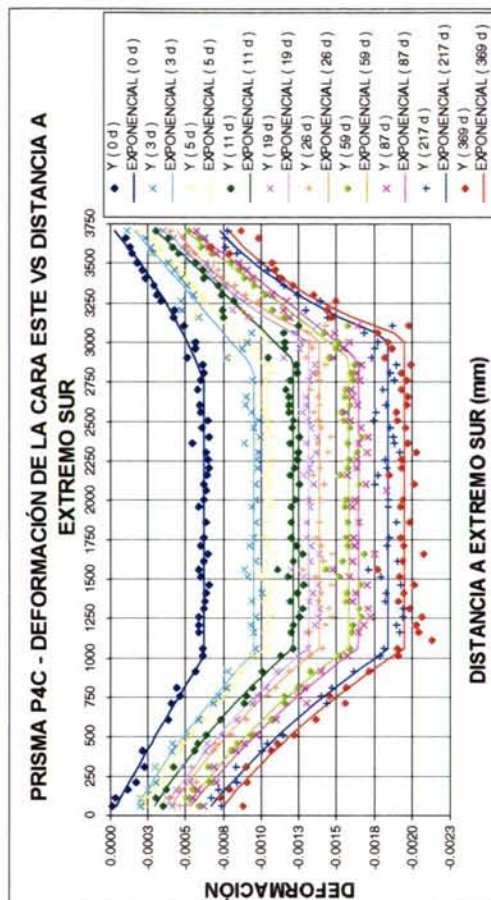




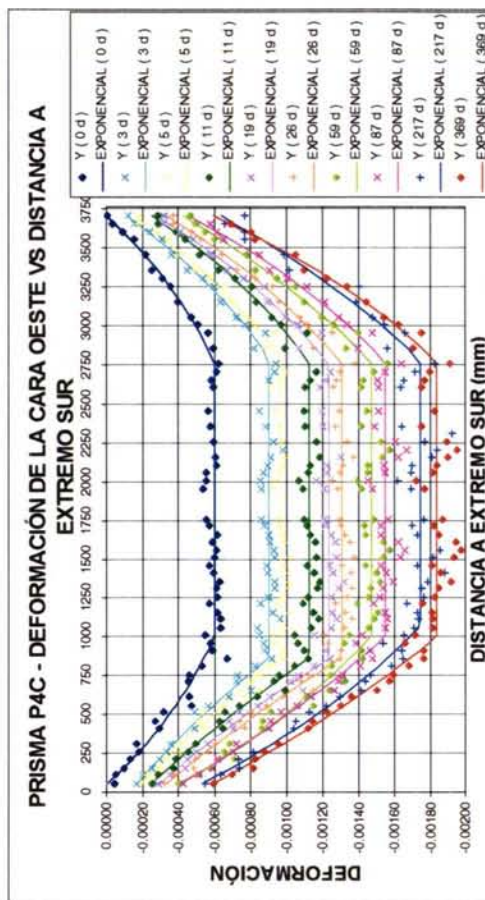
Gráfica 8.3.9-1



Gráfica 8.3.9-3



Gráfica 8.3.9-2



Gráfica 8.3.9-4

Tabla 8.3.9-1

Cara Este	P4C											
	Def 26 días		Def 59 días		Def 87 días		Def 111 días		Def 19 días		Def 369 días	
L = 3765 mm	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
L <sub>T1</sub> =	1000	906	925	921	923	934	881	828	763	826	731	833
L <sub>T2</sub> =	1000	1032	1026	1063	1077	1117	1065	1108	1065	1128	1060	1110
M =	-0.000611	-0.000610	-0.000943	-0.000943	-0.001038	-0.001038	-0.001211	-0.001206	-0.001312	-0.001314	-0.001947	-0.001952
m <sub>1</sub> =	0.000034	-0.000012	-0.000099	-0.000101	-0.000166	-0.000153	-0.000220	-0.000213	-0.000325	-0.000249	-0.000737	-0.000608
m <sub>2</sub> =	0.000000	0.000004	-0.000137	-0.000101	-0.000169	-0.000135	-0.000251	-0.000200	-0.000326	-0.000275	-0.000695	-0.000623
R <sup>2</sup> =	0.976850	0.978566	0.966706	0.965835	0.965714	0.964956	0.965219	0.964596	0.972007	0.968806	0.962830	0.958755
R <sup>2</sup> L <sub>t1</sub>	0.968851	0.962927	0.980076	0.978022	0.981867	0.978749	0.980703	0.967881	0.969904	0.966477	0.937196	0.934395
R <sup>2</sup> L <sub>t2</sub>	0.972334	0.977257	0.899241	0.899235	0.911652	0.915690	0.921015	0.928828	0.940122	0.937217	0.937196	0.934395
ERR.CUAD. =	0.501627	0.464442	1.469409	1.507866	1.863625	1.904799	2.175055	2.214048	2.027852	2.259680	4.420775	4.905408

Tabla 8.3.9-2

Cara Oeste	P4C											
	Def 26 días		Def 59 días		Def 87 días		Def 111 días		Def 19 días		Def 369 días	
L = 3765 mm	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
L <sub>T1</sub> =	1000	894	970	861	976	876	1001	920	1020	941	859	881
L <sub>T2</sub> =	1000	855	861	877	855	868	866	884	859	881	859	881
M =	-0.000595	-0.000590	-0.000897	-0.000894	-0.000971	-0.000967	-0.001125	-0.001125	-0.001234	-0.001234	-0.001947	-0.001952
m <sub>1</sub> =	0.000070	0.000020	-0.000029	-0.000070	-0.000074	-0.000106	-0.000162	-0.000228	-0.000184	-0.000253	-0.000737	-0.000608
m <sub>2</sub> =	0.000055	0.000021	-0.000119	-0.000096	-0.000149	-0.000123	-0.000196	-0.000172	-0.000243	-0.000209	-0.000695	-0.000623
R <sup>2</sup> =	0.970101	0.976106	0.979238	0.978846	0.983709	0.983072	0.982244	0.980380	0.983363	0.981180	0.962830	0.958755
R <sup>2</sup> L <sub>t1</sub>	0.946833	0.949109	0.974679	0.967939	0.977587	0.971829	0.981209	0.980769	0.981823	0.981748	0.937196	0.934395
R <sup>2</sup> L <sub>t2</sub>	0.990279	0.992332	0.984668	0.988300	0.982828	0.986995	0.978586	0.985146	0.980205	0.986006	0.937196	0.934395
ERR.CUAD. =	0.662090	0.529116	0.796886	0.811932	0.676235	0.702658	0.896472	0.990600	0.956922	1.082502	4.420775	4.905408





Tabla 8.3.10-4: Resumen coeficientes  $R^2$  en longitudes de transmisión, ajuste lineal

LINEAL		Este						Oeste					
		0 días	1 semana	1 mes	3 meses	6 meses	1 año	0 días	1 semana	1 mes	3 meses	6 meses	1 año
P1L10-1	L1T1	0.977436	0.963794	0.987121	0.989839	0.984503	0.989574	0.995065	0.665934	0.993732	0.985136	0.973949	0.988911
	L1T2	0.952658	0.962776	0.958937	0.958174	0.961246	0.955080	0.973866	0.987205	0.935819	0.947519	0.928745	0.934071
	L1T1	0.992562	0.961995	0.977394	0.911739	0.955066	0.961768	0.982855	0.982187	0.981529	0.933850	0.956788	0.972339
P2L10-1	L1T2	0.987078	0.989723	0.989525	0.984628	0.987848	0.983599	0.991050	0.991953	0.946578	0.952852	0.989722	0.956808
	L1T1	0.990768	0.986277	0.961471	0.952071	0.969535	0.977545	0.987339	0.981856	0.978421	0.974957	0.980727	0.985385
	L1T2	0.978457	0.989275	0.993591	0.989465	0.987095	0.987335	0.997709	0.996505	0.994644	0.991394	0.993837	0.993451
P1L3-1	L1T1	0.932737	0.961277	0.899358	0.927498	0.916101	0.928866	0.960392	0.964880	0.973019	0.862423	0.890119	0.895361
	L1T2	0.984390	0.983238	0.988315	0.986026	0.984603	0.982025	0.992118	0.981426	0.971833	0.978554	0.970207	0.973332
	L1T1	0.996024	0.989188	0.904770	0.964476	0.945067	0.962632	0.975920	0.977653	0.977163	0.929955	0.925447	0.936544
P2L3-1	L1T2	0.967863	0.970312	0.958350	0.961756	0.940130	0.971042	0.965343	0.980960	0.942263	0.980606	0.980120	0.984562
	L1T1	0.993821	0.982682	0.938121	0.926490	0.963703	0.956620	0.990620	0.987849	0.957991	0.940143	0.972945	0.964160
	L1T2	0.981823	0.976845	0.929272	0.946261	0.943252	0.944742	0.957162	0.964729	0.884423	0.903029	0.920721	0.922263
P3C	L1T1	0.951408	0.962505	0.964622	0.975806	0.981796	0.950282	0.972040	0.983040	0.937383	0.935132	0.860876	0.922072
	L1T2	0.936509	0.900291	0.958153	0.947315	0.939326	0.936194	0.981808	0.991668	0.989190	0.964744	0.975129	0.984641
	L1T1	0.962927	0.957942	0.965970	0.957942	0.969324	0.938355	0.949109	0.971829	0.983561	0.991842	0.992675	0.993596
P4C	L1T2	0.977257	0.959390	0.944031	0.959390	0.957990	0.934395	0.992332	0.986995	0.988837	0.971680	0.939129	0.984495

Tabla 8.3.10-5: Resumen coeficientes  $R^2$  en longitudes de transmisión, ajuste exponencial

EXPONENCIAL		Este						Oeste					
		0 días	1 semana	1 mes	3 meses	6 meses	1 año	0 días	1 semana	1 mes	3 meses	6 meses	1 año
P1L10-1	L1T1	0.978197	0.961171	0.986918	0.990253	0.985668	0.989839	0.993834	0.788797	0.993939	0.980979	0.978173	0.992172
	L1T2	0.963130	0.983908	0.960054	0.963042	0.973622	0.969069	0.987205	0.994812	0.961240	0.947575	0.929180	0.934893
	L1T1	0.995458	0.966287	0.954634	0.945828	0.967447	0.967669	0.985836	0.986572	0.983529	0.977845	0.983858	0.986611
P2L10-1	L1T2	0.987466	0.991505	0.991744	0.987798	0.991146	0.988918	0.993632	0.992862	0.946674	0.972834	0.990132	0.957439
	L1T1	0.995477	0.986320	0.961520	0.952374	0.969531	0.977636	0.989905	0.987429	0.987011	0.981584	0.981530	0.988224
	L1T2	0.986613	0.992079	0.994047	0.991700	0.990580	0.985324	0.997898	0.997645	0.995117	0.991416	0.992116	0.994655
P1L3-1	L1T1	0.929554	0.961624	0.934832	0.927498	0.916140	0.930007	0.984442	0.985473	0.991532	0.932988	0.940397	0.915718
	L1T2	0.984387	0.983320	0.988328	0.986026	0.984623	0.983099	0.988187	0.983861	0.976030	0.979817	0.970508	0.989527
	L1T1	0.996290	0.989517	0.936269	0.964694	0.941931	0.961935	0.979841	0.977959	0.973716	0.969664	0.962098	0.955512
P2L3-1	L1T2	0.987125	0.972804	0.976267	0.962120	0.941392	0.973025	0.965947	0.988361	0.971213	0.981131	0.974364	0.971844
	L1T1	0.994296	0.982664	0.961880	0.953016	0.981071	0.970900	0.992333	0.989289	0.968270	0.970944	0.976055	0.966029
	L1T2	0.986317	0.975318	0.945886	0.946417	0.950873	0.937491	0.961874	0.959887	0.898855	(DIV)	0.938655	(DIV)
P3C	L1T1	0.950773	0.962793	0.964737	0.976655	0.982540	0.944746	0.972698	0.984320	0.934415	0.937261	0.879750	0.924211
	L1T2	0.913768	0.900619	0.948464	0.924137	0.939523	0.942199	0.987889	0.992825	0.989804	0.965083	0.977365	0.984734
	L1T1	0.968851	0.981867	0.939288	0.965055	0.962013	0.931173	0.946833	0.977587	0.983143	0.981432	0.979736	0.981564
P4C	L1T2	0.972334	0.911652	0.947243	0.952499	0.963082	0.937196	0.990279	0.982828	0.983835	0.979868	0.957182	0.985208



### 8.3.10. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En las Tablas 8.3.10-1, 8.3.10-2 y 8.3.10-3 se presenta un resumen de las longitudes de transmisión máximas y mínimas a la edad de transferencia, y al año de la misma (en mm), para cada uno de los tipos de hormigón empleados en la fabricación de prismas: HL10-1, HL3-1 y HC.

En la Tabla 8.3.10-4 se presenta un resumen de los coeficientes  $R^2$  de las zonas de transmisión, correspondiente al ajuste lineal. El valor mínimo de la Tabla es de 0.666, el promedio de 0.963 y el máximo de 0.996. En la Tabla 8.3.10-5 se presentan los mismos valores, correspondientes al ajuste exponencial. Se observa que el valor mínimo es de 0.79, el máximo de 0.998 y el promedio de 0.969. Aparentemente el ajuste exponencial, considerando todos los prismas, es más adecuado. En el Capítulo 11 se efectuará un análisis riguroso de ambos métodos.

Como conclusiones del análisis de los resultados de la medida de las deformaciones del hormigón, en las caras laterales de los prismas, cabe destacar:

- Todos los prismas de los hormigones ligeros HL10-1 y HL3-1 presentaron fisuración por hendimiento diferida, fisuración que se generalizó a lo largo de todo el elemento.
- En todos los prismas de hormigón ligero, excepto el P3L10-1, se apreció el aumento de las zonas de transmisión con el tiempo, de modo que llegaron prácticamente a unirse, es decir, desapareció la zona interior de deformación constante. Esto significa que la pérdida de adherencia puede haber originado una disipación parcial de la fuerza de pretensado a lo largo de todo el elemento. En este caso la longitud de transmisión se refiere a una fuerza de pretensado menor que la fuerza  $P(t)$ . Por ello empleamos el concepto de longitud de transmisión aparente.
- Se ha constatado que las pérdidas instantáneas de pretensado del hormigón convencional son menores que las experimentadas por los elementos de hormigón ligero, lo que es debido al mayor módulo de deformación del HC. Dado que la fuerza de pretensado que se transfiere a lo largo de la longitud de transmisión es superior en los prismas de HC, realmente habría que establecer una comparación relativa entre ambos tipos de material, en función de la fuerza unitaria adherente (FUA) a lo largo de la longitud de transmisión de cada material (MAT) a la edad  $t$ .

$$\left. \frac{\Delta P(t)}{\Delta x} \right]_{l_{\text{opt}}, \text{MAT}}$$

- La longitud de transmisión de los prismas de HC está acotada inferiormente por el valor de 714 mm. La cota superior resultante del análisis, de 1110 al cabo de un año supone un valor un 55% superior. Tanto la longitud como el recubrimiento adoptado han demostrado ser suficiente para este material.
- La longitud de transmisión de los prismas de HL10-1 está acotada inferiormente por el valor de 780 mm. La cota superior resultante del análisis, 2488 mm, es superior a la mitad del prisma, por lo que realmente lo que sucede es que la longitud del prisma es insuficiente para garantizar la correcta transmisión del pretensado, una vez se ha generalizado la fisuración longitudinal.



- La longitud de transmisión de los prismas de HL3-1 está acotada inferiormente por el valor de 743 mm. La cota superior resultante del análisis, 13034 mm, no tiene sentido físico, corresponde a un caso de longitudes de transmisión divergentes, explicado en el Apartado 8.3.7: lo que realmente sucede es que la longitud del prisma es insuficiente para garantizar la correcta transmisión del pretensado, una vez se ha generalizado la fisuración longitudinal.
- Se observa que la longitud mínima de transmisión del hormigón ligero HL3-1, el de mejores características resistentes y reológicas, es un 5% menor que la del HL10-1.
- Las longitudes de transmisión superior e inferior de los hormigones HL3-1 y HL10-1 son superiores a las del hormigón convencional, desde la edad de transferencia. De esto resulta que la capacidad adherente del hormigón ligero es menor que la del hormigón convencional.
- Exceptuando el prisma P1L3-1, que sufrió rotura por estallido-hendimiento al transferir, la fisuración fue detectada visualmente en los prismas de ambos hormigones ligeros tiempo después de la transferencia. En los análisis de este apartado se puede apreciar que los cambios apreciables de comportamiento de los prismas se producen muy ajustadamente a las edades a las que se detectó fisuración. Por ello, concluimos que estamos ante un fenómeno de fisuración por hendimiento diferido, es decir, tiempo después de la transferencia, entre 10 y 60 días aproximadamente.
- Tras el inicio de la fisuración de los prismas de hormigón ligero se produce una propagación gradual de la fisura, a lo largo de toda la longitud de estos elementos. La fisura se generaliza a lo largo de todo el elemento, al cabo de días o semanas del inicio de la fisuración. De esto se deduce que el hormigón ligero sin armadura de confinamiento es incapaz de frenar la propagación de fisuras.
- Las dimensiones adoptadas para la sección transversal de los prismas de pretensado han demostrado ser suficientes para el hormigón convencional, e insuficientes para el hormigón ligero. Por esto se establece una diferencia clara entre ambos materiales: el recubrimiento adoptado, de 45 mm, es suficiente para el hormigón convencional e insuficiente para el hormigón ligero. Para este último material se hace necesario aumentar el recubrimiento o bien colocar armadura transversal de confinamiento.
- La correlación entre las medidas procedentes de la instrumentación y las mecánicas es excelente. Además, ambas proporcionan datos complementarios. Las medidas de instrumentación electrónica proporcionan información durante el proceso de transferencia, y permiten conocer qué sucede en el cordón de pretensado. Es conveniente disponer de medidas redundantes, para poder detectar errores descalibraciones, y para evitar pérdida de datos por incidencias eléctricas.
- El ajuste exponencial parece más apropiado para los prismas de HL, antes y después de la fisuración por hendimiento. Sin embargo, en el caso de los prismas de HC, el ajuste lineal presenta un grado de ajuste mejor a la edad de transferencia. Tras la misma, no predomina ninguno de los dos métodos.

En los siguientes apartados se aborda el estudio de las posibles causas de este fenómeno, deducidas a partir del estudio bibliográfico de las propiedades diferidas del hormigón ligero, y del análisis de los ensayos realizados.



#### **8.4. ANÁLISIS DE LAS POSIBLES CAUSAS DE FISURACIÓN DE LOS PRISMAS PRETENSADOS DE HORMIGONES LIGEROS HL3-1 Y HL10-1**

Del estudio bibliográfico realizado y de los resultados de los ensayos, se han deducido los siguientes factores como posibles causantes de la fisuración diferida observada en los prismas de hormigón ligero:

- I. Insuficiente recubrimiento del cordón de pretensado, para un elemento sin armadura transversal. El recubrimiento adoptado es ligeramente inferior al límite inferior recomendado por el código modelo (CM90) para vigas de hormigón convencional sin armadura transversal.
- II. En todo caso, los hormigones HL3-1 y HL10-1 presentan características mecánicas a tracción inferiores a las que presenta el hormigón convencional (brasileño, tracción directa y flexotracción).
- III. Fouré (FOUR85a, FOUR85b) hace referencia en sus trabajos a determinados tipos de hormigón ligero que sufren un deterioro progresivo manifestado como una pérdida de resistencias con la edad en unas ciertas condiciones ambientales. Convendría hacer un estudio de la evolución de las resistencias a compresión y a tracción con la edad, para probetas sometidas a diferentes tipos de ambiente.
- IV. El coeficiente de cansancio a tracción del hormigón ligero es menor que el correspondiente al hormigón convencional (FOUR85a, FOUR85b). Esto motiva que, aunque el hormigón ligero presente la misma resistencia a tracción instantánea que el hormigón convencional la resistencia a tracción sostenida será menor.
- V. Como se vio en el Apartado 2.3.2.2, la energía de fractura del hormigón ligero es inferior a la que corresponde al hormigón convencional (CURR95), de aproximadamente un 20 a un 30% menor. Esto implica que el HL tiene, a igual resistencia a tracción que un hormigón convencional, una mayor tendencia a fisurar.
- VI. La posición del cable de pretensado en los prismas es posición II, desfavorable respecto a la adherencia (según EHE98 y CM90). Dependiendo de la sección transversal adoptada para la viga pretensada, los cordones de pretensado estarán en posición desfavorable o favorable respecto a la adherencia. En todo caso, el ensayo de prisma estará del lado de la seguridad.

##### **8.4.1. PRINCIPALES DIFERENCIAS ENTRE LOS PRISMAS COMERCIALES Y LOS ENSAYADOS**

Las principales diferencias que se pueden establecer entre las vigas reales de hormigón pretensado y los prismas, diferenciando entre las favorables y las desfavorables con respecto a la realidad, se presentan en la Tabla 8.4.1-1.

De todo esto resulta que las condiciones reales de trabajo de las vigas pretensadas habituales difieren significativamente de los prismas fabricadas en el laboratorio.

Por ello la dirección a seguir no es única y no se pueden descartar las dosificaciones empleadas hasta ahora, puesto que parece que la realidad podría ser más favorable.

Tabla 8.4.1-1

Diferencia	Carácter
En los prismas fabricados, el recubrimiento neto de la armadura activa es de 45 mm. Si bien en las vigas comerciales el recubrimiento libre es de 42 mm, en éstas siempre se dispone armadura transversal y una cierta armadura de confinamiento para prevenir, o al menos limitar la fisuración por exfoliación, estallido y hendimiento.	Dudoso
El recubrimiento mínimo recomendado por el CM-90 para cordones sin armadura transversal es de $3\phi$ , es decir, 46 mm, prácticamente igual al adoptado en los prismas fabricados, si bien ligeramente superior. Por otra parte, el CUR (CUR95) recomienda que el recubrimiento de los cordones respecto a caras de vigas pretensadas de hormigón ligero que no estén en contacto con el molde se aumente en 5 mm respecto al valor nominal, para evitar el efecto desfavorable de las irregularidades superficiales.	Desfavorable
La disposición del cordón de pretensado, centrado en la sección transversal del prisma, de canto total 10.5 cm, hace que la posición de nuestro cordón de pretensado sea tipo II, o sea, la más desfavorable. En una viga pretensada comercial esta posición la ocupan los ocasionales cordones pretensados de la parte superior de la sección, y ocasionalmente cordones de pretensado inferiores de secciones como la de tipo cajón. En los extremos de este tipo de vigas se suele macizar parcialmente la sección, en una longitud de aproximadamente 0.5 a 2 metros. Esta longitud suele ser suficiente para que se haya transferido la mayor parte de la fuerza de pretensado en el interior de la zona macizada. Por ello cuando la sección pasa a ser la estricta, que es cuando los cordones ocupan posición II respecto a adherencia, ya no se producen tensiones transversales excesivas.	Desfavorable
En los prismas fabricados sólo hay un cordón de pretensado, no hay cordones adyacentes que perturben la región de hormigón próxima al cordón de pretensado.	Favorable

#### 8.4.2. POSIBLES MEDIDAS PARA REDUCIR LA PROBABILIDAD DE FISURACIÓN

Del análisis bibliográfico realizado y de las posibles causas de la fisuración por hendimiento diferidas, se han deducido las siguientes medidas para reducir la probabilidad de fisuración:

- I. Aumentar la edad de transferencia a 3 o 4 días. Si bien la ganancia de resistencia a compresión y tracción es reducida, nos permite prolongar el período de curado a 48 o 72 horas, es decir, duplicarlo o triplicarlo. En la bibliografía se insiste en la importancia del período de curado en el caso de hormigones ligeros (WEIG74). Hay que tener en cuenta que el contenido de cemento por metro cúbico de hormigón ligero es superior al del hormigón convencional, por lo que el calor de hidratación generado es superior y, además, se disipa peor debido al excelente aislamiento térmico (WEIG74). El aumentar la edad de transferencia posibilitaría la prolongación del curado durante el tiempo de máximo crecimiento de resistencias. Este período de tiempo coincide con el período de mayor producción de calor de hidratación del cemento, de aproximadamente dos días para el cemento empleado en esta investigación, CEM I 52.5 R (MART98). Hasta ahora el período de curado se extendía durante las primeras veinte horas.



- II. Macizar la sección en la zona próxima a apoyos, prolongando esta zona de modo que en ésta se produzcan las tensiones de exfoliación, estallido y hendimiento. De esta forma se consigue que la práctica totalidad de los cordones estén en posición I.
- III. Disminuir la tensión inicial de los cordones de pretensado (históricamente, la tensión máxima de tesado pasó del  $0.7 f_{pm\acute{a}x}$  a  $0.75 f_{pm\acute{a}x}$ ). Si bien esta medida es ligeramente antieconómica (desaprovechamos un 7% de la capacidad portante de los cordones), favorece que existan tensiones moderadas a lo largo de la zona de transmisión, lo que disminuiría las tensiones de tracción en la zona de transmisión.
- IV. Colocar espiras de acero alrededor de los cordones de pretensado, para confinar el hormigón que los rodea y evitar la aparición de fisuras. Esta medida complicaría la ejecución, aumentando los costes.
- V. Aumentar la proporción de arena disminuyendo la cantidad de arlita (hormigón menos ligero). Esto implicaría un cambio de dosificación, que conllevaría una etapa previa de caracterización de los nuevos hormigones y la pérdida de los beneficios estructurales perseguidos.
- VI. Añadir fibras de acero al hormigón ligero, con el fin de aumentar la resistencia a tracción del mismo, a lo largo de toda la viga o en los anclajes. Esto implicaría un incremento de coste del material.
- VII. Estudiar los diferentes acabados superficiales suministrados por los fabricantes de los cordones de pretensado. Las fisuras por adherencia ("splitting cracks") pueden aparecer debido a tensiones de adherencia demasiado elevadas. El empleo de cordones con acabado superficial más liso conducirá a una mayor longitud de anclaje, pero disminuirá la probabilidad de fisuración de este tipo.
- VIII. Reducir las tensiones de adherencia mediante enfundado parcial de los cordones de pretensado. De esta forma se conseguiría un escalonamiento de la fuerza de pretensado, lo que reduciría las tensiones en la zona de anclaje. De todos modos, hay que tener en cuenta que la ACI considera que la longitud de transmisión de los cordones de pretensado parcialmente enfundados es el doble de la correspondiente a cordones adherentes actuantes a lo largo de toda su longitud.
- IX. Se podría estudiar la posibilidad de utilizar cordones de pretensado de menor diámetro, como los de 12.7 mm (0.5") que tienen mejores propiedades de adherencia: menos carga por cordón, más superficie de contacto con el hormigón. No olvidemos que en USA, al menos hasta el año 1998 la FHWA prohibía el uso de cordones de pretensado de 15.2 mm (0.6"), admitiéndolo sólo en contadas ocasiones. Habría que evaluar el coste de esta posibilidad sin olvidar que, a menor peso de la viga, disminuye el pretensado necesario. Además, la longitud de anclaje sería proporcionalmente menor a la disminución de diámetro. La FHWA impuso, como dato adicional, el aumento de las distancias mínimas entre cordones de pretensado y los recubrimientos mínimos.
- X. Estudiar la posibilidad de hacer vigas combinando hormigón convencional y hormigón ligero: en los extremos, donde hay máximo cortante y se desarrolla la adherencia, hormigón convencional, y en el centro, hormigón ligero.

- XI. Colocar armadura transversal de confinamiento en la zona cercana a apoyos.
- XII. Aumentar los recubrimientos mínimos respecto a los establecidos en normativa y a los valores adoptados en fábrica. Esta decisión no tendría repercusión significativa en los costes.
- XIII. Aumentar la distancia libre entre armaduras activas respecto a los establecidos en normativa y a los valores adoptados en fábrica. Habría que hacer un estudio de viabilidad y costes.

## 8.5. PLANTEAMIENTO DE VÍAS DE CONTINUACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

En este apartado se analizan las posibles medidas para reducir la probabilidad de fisuración del apartado anterior, a fin de plantear las vías preferentes de continuación de la investigación.

La medida II se descarta, por conllevar la pérdida de aligeramiento de las vigas, que es precisamente el objetivo de esta investigación.

La medida III se desestima por antieconómica, va en contra del máximo aprovechamiento de los materiales.

La medida IV implica el aumento de densidad de armadura de la zona de anclaje, de por sí elevada. Además, conlleva un aumento considerable del coste de mano de obra, por lo que se descarta.

Las medidas VII y IX se desechan, por ser antieconómico el empleo de cordones de pretensado de características geométricas diferentes a las de los habituales en fábrica.

La medida VIII se emplea habitualmente en la producción, cuando es necesario por motivos de diseño. Realmente no soluciona el problema, contribuye a paliarlo.

La medida XII redundante en una disminución del canto útil de las vigas, con la consiguiente merma de la capacidad resistente. En último término, en caso de fallo de las vías adoptadas se podría retomar esta opción.

Por lo que respecta a la XIII, conlleva un aumento de coste, por la necesidad de cambiar de los anclajes. Además, disminuye la fuerza de pretensado total de la sección, lo que limita la capacidad resistente de la misma, respecto a la sección de hormigón convencional. Por esto se desecha.

Con las medidas restantes, se han planteado las siguientes vías de continuación de los ensayos:

- Vía 1: contempla la medida I.
- Vía 2: contempla las medidas I y XI.
- Vía 3: contempla la medida V, planteando nuevas dosificaciones de hormigón ligero de mayor densidad. En caso de que la mejora de propiedades fuese insuficiente, se podría plantear la vía VI y/o la vía X.

A continuación se desarrollan cada una de las vías planteadas.



#### **8.5.1.1. Vía 1: Estudio de la edad de transferencia, condicionada por las propiedades diferidas del hormigón ligero: evaluación del coeficiente de cansancio a tracción**

La vía I consiste en la profundización en el problema detectado de fisuración diferida. Creemos que ésta se debe a problemas de cansancio a tracción: es decir, la resistencia a tracción es suficiente para prevenir la fisuración durante la transferencia, pero las tensiones originadas son superiores a la resistencia a tracción diferida. Esto puede explicar el hecho de que las fisuras se manifiesten una vez transcurrido cierto tiempo desde la transferencia.

Si no se modifica la dosificación de los hormigones ligeros, es decir, si se mantienen las dosificaciones de HL3-1 y HL10-1, se puede plantear retrasar la edad de transferencia hasta que la resistencia a tracción diferida sea superior a las tensiones transversales originadas en la zona de transmisión. El condicionante es la rentabilidad del proceso de fabricación: un retraso apreciable de la edad de transferencia conlleva una menor productividad de la bancada.

La exploración de esta vía se planteó en dos etapas:

- Búsqueda bibliográfica exhaustiva, del cansancio a compresión y a tracción de los hormigones ligeros, convencionales y de alta resistencia.
- En caso de que no se obtuviese de la búsqueda anterior información suficiente, se plantearía una campaña experimental de ensayos a tracción directa sostenida.

Realmente la información obtenida a partir del estudio bibliográfico (resumida en el Capítulo 2, Apartado 2.3.3), proporcionó unos valores orientativos muy valiosos para el coeficiente de cansancio a tracción de los materiales iniciales, HC, HL10-1 y HL3-1, como se explica más adelante en este capítulo, que permitieron perfilar los criterios de búsqueda de las nuevas dosificaciones de hormigón ligero.

#### **8.5.1.2. Vía 2: Fabricación de elementos con más armadura de confinamiento**

Puesto que la fisuración de los prismas pretensados sin armadura pasiva no cuestionaba, en principio, el funcionamiento de elementos pretensados con armadura de confinamiento, antes de desechar las dosificaciones de hormigón ligero existentes, se decidió construir vigas pretensadas de armadura pretesa con el hormigón ligero de peores prestaciones, HL10-1. Estos ensayos se detallan en el Capítulo 8, y sus resultados se analizan en el Capítulo 9.

Se trata de fabricar elementos pretensados con dos o más cordones de pretensado excéntricos, a ser preferible tres, con armadura transversal (para hacer posible la manipulación/transporte y evitar el agotamiento por esfuerzo cortante durante el ensayo a flexión).

Esta vía se exploró (véanse Capítulos 9 y 10), pero las vigas fabricadas de HL10-1 presentaron los mismos problemas de fisuración.

#### **8.5.1.3. Vía 3: Planteamiento de nuevas dosificaciones**

La tercera vía consiste en la búsqueda de una nueva dosificación para el de peores prestaciones, el HL10-1, sacrificando parcialmente el ahorro en peso. La nueva

dosificación presentaría un contenido porcentual de arena superior, y consecuentemente un contenido de arcilla expandida menor.

El ajuste de la nueva dosificación se planteó por compensación de volumen (ACIC92a, ACIC97) se reduciría un volumen de arlita igual al aumento de volumen de arena, a fin de mantener la cantidad de cemento por metro cúbico constante. Por lo que respecta a la relación A/C, convendría disminuirla, para obtener mejores resistencias.

Ante la fisuración presentada por las vigas de HL10-1 fabricadas, según la vía 2, se adoptó finalmente esta vía. En el siguiente apartado, se explican los criterios de búsqueda de las nuevas dosificaciones.

### 8.5.2. CRITERIOS DE OBTENCIÓN DE LAS NUEVAS DOSIFICACIONES

En este apartado se resumen las propiedades del hormigón que tiene en cuenta la formulación de la EHE (EHE98), para la determinación aproximada de las longitudes de transmisión y anclaje en hormigones convencionales. Estas son, de modo resumido:

- Resistencia característica del hormigón.
- Resistencia característica superior a tracción del hormigón a la edad de transferencia (longitud de transmisión).
- Resistencia característica superior a tracción del hormigón durante el servicio, que será como mínimo el valor correspondiente a 28 días<sup>8.3</sup> (longitud complementaria a tracción).

A estos factores, puesto que el pretensado es una acción de carácter permanente, habrá que añadir como parámetro el coeficiente de cansancio, es decir, el factor que, aplicado a la resistencia de los ensayos normalizados, nos proporciona la tensión que puede soportar el hormigón de forma permanente sin que se produzca rotura diferida.

Como vimos en el Apartado 2.1, inmediatamente tras la transferencia, en la zona de transmisión se generan unas tensiones transversales, según planos normales a la armadura activa, debidas al gradiente de la fuerza de pretensado.

Para evitar que se produzca fisuración por hendimiento en el momento de la transferencia, las tensiones originadas han de cumplir la condición:

$$\sigma_c \leq f_{ct,j}$$

$j$  edad de transferencia de pretensado, en días

Si bien la fuerza de pretensado disminuye con el tiempo, debido a las pérdidas diferidas, estamos del lado de la seguridad si la consideramos como una acción permanente de valor constante. De este modo, el pretensado se comporta como una carga aplicada de forma instantánea a la edad de transferencia, que se mantiene con el tiempo. Para evitar el agotamiento del hormigón por cansancio a tracción, es necesario fijar un umbral crítico de tensiones:

$$\sigma_c \leq \alpha_{ct,j} f_{ct,j}$$

<sup>8.3</sup> Para hormigones sometidos a condiciones ambientales, tales que la función que relaciona la resistencia instantánea con la edad sea monótona creciente (FOUR85a, FOUR85b).



donde:

- $\sigma_c$  tensión transversal del hormigón, positiva a tracción  
 $\alpha_{ct,j}$  coeficiente de cansancio a tracción del hormigón, correspondiente a una edad de aplicación de la carga de  $j$  días  
 $f_{ct,j}$  resistencia a tracción del hormigón, a la edad de transferencia de pretensado  $j$  días

Haciendo la hipótesis de que la tensión transversal del hormigón es directamente proporcional al módulo de Poisson, al gradiente de pretensado, e inversamente proporcional al perímetro adherente del cordón, tendremos:

$$\sigma_c = \frac{k}{2\pi c} \nu \frac{\Delta P}{\Delta x} \Big]_{l_{bpt}, MAT}$$

donde:

- $k$  coeficiente que depende de la forma de la sección, presencia de cordones adyacentes,...  
 $c$  recubrimiento del pretensado  
 $\nu$  módulo de Poisson  
 $\frac{\Delta P}{\Delta x} \Big]_{l_{bpt}, MAT}$  F.U.A. a lo largo de la longitud de transmisión, del elemento del material (MAT) considerado

En el caso del hormigón convencional, ninguno de los prismas experimentó fisuración por hendimiento, para una edad de transferencia de dos días, por lo que se cumple:

$$\sigma_{c,HC} = \frac{k}{2\pi c} \nu_{HC} \frac{\Delta P(2)}{\Delta x} \Big]_{l_{bpt}, HC} < \alpha_{HCt,2} f_{HCt,2}$$

Para evitar la fisuración diferida en los elementos de hormigón ligero, para una edad de transferencia de  $j$  días, se ha de cumplir:

$$\sigma_{c,HL} = \frac{k}{2\pi c} \nu_{HL} \frac{\Delta P(j)}{\Delta x} \Big]_{l_{bpt}, HL} < \alpha_{HLt,j} f_{HLt,j}$$

En el caso los hormigones ligeros HL3-1 y HL10-1 la F.U.A. resultó inferior a la F.U.A. de los prismas de hormigón convencional, por ser menor la fuerza de pretensado transferida y mayor la longitud de transferencia. En el Capítulo 4, vimos que el módulo de Poisson de ambos materiales es similar, si bien el del HL10-2 es un 20% superior.

De esta forma, las tensiones que se producen en ambos elementos serán similares:

$$\sigma_{c,HC} \approx \frac{\nu_{HL}}{\nu_{HC}} \sigma_{c,HL}$$

Con estas premisas, si consideramos conjuntamente ambas desigualdades, estaremos del lado de la seguridad si cumplimos:

$$f_{HL,j} \geq \frac{\alpha_{HCt,2}}{\alpha_{HL,j}} \frac{v_{HL}}{v_{HC}} f_{HCt,2}$$

donde:

$j$	edad de transferencia de pretensado para los elementos pretensados de hormigón ligero
$f_{HL,j}$	resistencia a tracción directa del hormigón ligero a la edad de transferencia
$f_{HCt,2}$	resistencia a tracción directa del hormigón convencional, a la edad de transferencia habitual de 2 días
$v_{HC}$	módulo de Poisson del HC, aproximadamente 0.20 (Apartado 4.3.6.1)
$v_{HL}$	módulo de Poisson del HL, aproximadamente 0.25 (Apartado 4.3.6.2)
$\alpha_{HCt,2}$	coeficiente de cansancio a tracción del hormigón convencional, para cargas aplicadas a la edad de transferencia habitual de 2 días
$\alpha_{HL,j}$	coeficiente de cansancio a tracción del hormigón ligero, para cargas aplicadas a la edad de transferencia de pretensado de $j$ días

Para garantizar el cumplimiento de esta condición, se pueden manejar dos variables:

- Edad de transferencia del pretensado: se podría plantear retrasar la edad de transferencia en el caso de hormigones ligeros, hasta que presente una resistencia a tracción a largo plazo suficiente para la edad de transferencia  $j$ .
- Variación de la dosificación de hormigón ligero, de modo que aumente su resistencia a tracción a largo plazo para la edad de transferencia  $j$  y se cumpla la anterior ecuación.

Si se transfiere el pretensado de los elementos de hormigón ligero a los 2 días del hormigonado,  $j = 2$ , resulta:

$$f_{HL,2} \geq \frac{\alpha_{HCt,2}}{\alpha_{HL,2}} \frac{v_{HL}}{v_{HC}} f_{HCt,2}$$

Como se ha expuesto en el Capítulo 3, Fouré realizó un estudio comparativo de diferentes hormigones relativo a fenómenos de rotura diferida, investigación que se puede resumir en los siguientes puntos (FOUR85a, FOUR85b):

- Se realizaron ensayos a carga constante tanto a compresión como a tracción para tres tipos de hormigón: hormigón convencional, hormigón de alta resistencia y hormigones ligeros de arcilla expandida y arena natural de menores resistencias que los estudiados en la presente investigación.
- El autor concluye que el coeficiente de cansancio a tracción y compresión para un mismo material es muy similar, por lo que adopta un mismo valor.



- El autor realizó ensayos variando la edad de aplicación de la carga, entre 3 días y 125 días de la fecha de fabricación del hormigón, de los que dedujo que no existía una diferencia apreciable de los coeficientes de cansancio de un mismo material.
- Por ello, como conclusión, plantea para cada material e independientemente de la edad de carga, los coeficientes de cansancio de la Tabla 8.5.2-1.

Tabla 8.5.2-1

Tipo de hormigón		Hormigón convencional y de alta resistencia	Hormigón ligero
Notación		$\alpha_{HC}$	$\alpha_{HL}$
Coeficiente de cansancio a compresión y a tracción, correspondiente a una vida útil de 100 años	Inferior	0.74	0.69
	Superior	0.81	0.77
	Medio	<b>0.78<sup>8.4</sup></b>	<b>0.73<sup>8.5</sup></b>

Si consideramos los valores medios para ambos materiales, teóricamente evitaríamos la fisuración por hendidamiento cumpliendo la siguiente relación:

$$f_{HL,j} \geq 1.07 f_{HC,2} \approx 3.5 \text{ MPa}$$

Es decir, nos planteamos como objetivo la búsqueda de un hormigón ligero y de una edad de transferencia que cumplan la condición anterior, muy restrictiva. Para ello se ha de aumentar la densidad del hormigón ligero y/o la edad de transferencia.

En todo caso, sería conveniente realizar una investigación exhaustiva acerca de los coeficientes de cansancio de hormigones de alta resistencia convencionales y de áridos ligeros, como los estudiados en esta investigación, frente a esfuerzos de tracción y compresión, destinada a desarrollar recomendaciones específicas para el dimensionamiento de estructuras con estos materiales: diagramas tensión deformación de proyecto y cálculo, módulos de deformación y comportamiento diferido.

Las condiciones anteriormente expuestas, tanto la de transmisión como las de servicio, serán las que tengamos en cuenta para la búsqueda de las nuevas dosificaciones de hormigón ligero. Por ello se puede hablar de un proceso de optimización de la dosificación de hormigón ligero, siendo los parámetros los de la Tabla 8.5.2-2:

Tabla 8.5.2-2

Variables	Dosificación y edad de transferencia
<b>Función Objetivo:</b> Mínima densidad	$\min(\rho_{HC})$
<b>Restricción 1</b>	$\rho_{HL} < \rho_{HC}$
<b>Restricción 2:</b> Transferencia	$f_{LC,2} \geq \frac{\alpha_{HC}}{\alpha_{LC}} \frac{v_{HL}}{v_{HC}} f_{HC,2}$

<sup>8.4</sup> Habitualmente se adopta 0.85 (EHE98).

<sup>8.5</sup> El Eurocódigo recomienda valores del coeficiente de cansancio de entre 0.77 y 0.80 para compresiones permanentes.

Definidos el objetivo y las restricciones, se realizó un proceso de búsqueda de las nuevas dosificaciones de hormigón ligero, que hemos resumido en el Apartado 4.3.2.

Las probetas de tracción directa de la dosificación nominal HL10-2 realizadas en el Laboratorio de Ingeniería de la Construcción, ensayadas en Oural a las 48 horas del final de amasado, proporcionaron valores de resistencia a tracción directa superiores a 3.5 MPa.

Sin embargo, las amasadas de HL10-2 realizadas en la fábrica de Outeiro de Rei, para la realización de las vigas de la segunda serie, debido a un exceso de humedad de los áridos, proporcionaron valores de resistencia a tracción directa inferiores (véase el Apartado 4.3.4.3), en torno a 3.3 MPa.

La humedad media de la arlita, determinada a partir de varias muestras recogidas antes del amasado del propio silo, fue del 13.5%. A partir de entonces, en todas las amasadas realizadas en el laboratorio para los ensayos de pórtico, cuyos resultados se exponen en el Capítulo 4, se empleó arlita con el 13.5% de humedad, a pesar de lo cual se mantuvo la denominación de HL10-2.



## *Capítulo 9*

# **DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD DE ANCLAJE EN VIGAS PRETENSADAS**

### **9.1. INTRODUCCIÓN**

Como ya se explicó en el Capítulo 8, todos los prismas pretensados de los hormigones ligeros HL3-1 y HL10-1-1 fabricados fisuraron por estallido/hendimiento en la zona de transmisión, tras la transferencia. Tras el análisis de las posibles causas de este tipo de fisuración, se concluyó que:

- El pretensado de los prismas presentaba el mismo recubrimiento que el adoptado en la fabricación de grandes vigas. Sin embargo, estos elementos no disponían de armadura pasiva alguna que pudiese limitar la abertura de fisuras y contribuir a frenar su propagación.
- Se considera probada la mayor tendencia de los prismas de hormigón ligero a la fisuración: de hecho, todos los prismas de HL fisuraron a lo largo de toda su longitud. La fisuración se detectó tiempo después de la transferencia. Este material no es capaz de frenar o limitar la propagación de fisuras en ausencia de armadura pasiva.
- Esto pone en evidencia que el recubrimiento adoptado para los prismas (45 mm) es adecuado para el hormigón convencional estudiado, pero insuficiente para el hormigón ligero. El recubrimiento mínimo adoptado en las investigaciones coordinadas por la FHWA, realizadas sobre cordón de 15.2 mm de diámetro, fue de 43 mm (FHWA94), valor algo inferior al empleado en la presente investigación. De todas formas, en este caso la sección transversal empleada era rectangular, de 102×127 mm (4×5"), con un área un 17% superior a la empleada en esta investigación. Esto conduce a tensiones medias de compresión longitudinales en el hormigón tras la transferencia menores en la zona central del prisma, en el caso de la FHWA.
- Las dimensiones de la sección transversal de los prismas son adecuadas, puesto que ponen de manifiesto un problema específico del hormigón ligero: el recubrimiento adoptado es suficiente para el hormigón convencional, e insuficiente para el hormigón ligero. Por otra parte, aparece un tipo de fallo del que no se han encontrado referencias en la literatura: fisuración por hendimiento diferida, es decir, que aparece o se hace visible transcurrido un tiempo desde la transferencia.

- Sin embargo, las cuestiones que se plantean a la vista de estos resultados son: ¿Es este ensayo representativo de las condiciones reales de trabajo de las vigas pretensadas? El resultado negativo de estos ensayos para el hormigón ligero ¿es suficiente argumento para desechar una dosificación o un material? ¿Aparecerían estas fisuras en elementos reales fabricados con estas dosificaciones de HL?, y en caso de aparecer estas fisuras ¿lograrían propagarse a pesar de las elevadas cuantías de armadura transversal en la zona de anclaje, o bien lograría la armadura pasiva evitar la fisuración, o al menos limitar la abertura y longitud de las fisuras por hendimiento?

Los ensayos realizados con prismas limitan el conocimiento de la zona de anclaje a la longitud de transmisión, dada la imposibilidad de estudiar con un pretensado centrado las propiedades de la zona de anclaje; la sección es muy frágil, ensayados estos elementos a flexión, el pretensado apenas vería aumentada su tensión antes de que se produjese el agotamiento por compresión en el hormigón.

Por ello, antes de proponer cambios en las dosificaciones de hormigón ligero, se decidió contrastar los resultados de estos ensayos, fabricando para ello elementos pretensados con pretensado excéntrico “a escala” en fábrica, a fin de:

- Estudiar el comportamiento de vigas con pretensado excéntrico en la zona de transmisión.
- Evaluar la tendencia a fisuración por hendimiento para diferentes cuantías de armadura de confinamiento colocada en los extremos de la viga.
- Estudiar el comportamiento hasta rotura de elementos pretensados de hormigón ligero con pretensado excéntrico, comparativamente a elementos de hormigón convencional.
- Conocer la extensión y propiedades de la zona de anclaje de vigas pretensadas de hormigón ligero.
- Desarrollar criterios de armado para la zona de anclaje, específicos para este tipo de material.

A estos elementos, que constituyen prototipos de vigas reales, en adelante se les denominará “vigas pretensadas”, para diferenciarlas de los “prismas pretensados”.

La dosificación de hormigón ligero adoptada fue inicialmente la correspondiente al HL10-1, por ser el material de menor resistencia instantánea a compresión y a tracción, y el más susceptible de experimentar deformaciones diferidas superiores. Se preveía fabricar además elementos similares de hormigón convencional, siguiendo las pautas de este estudio, planteado en términos comparativos.

El dimensionamiento de la sección y de la armadura pasiva de estos elementos se hizo siguiendo:

- El Eurocódigo UNE-ENV 1992, partes 1-4 y 1-1 (E21496 y E21193), relativas a hormigón de árido ligero de estructura cerrada y a hormigón convencional respectivamente. La armadura resultante de estos cálculos, necesaria para el material menos resistente a tracción, el hormigón ligero HL10-1, se dispondría también en las vigas de hormigón convencional, a fin de comparar el comportamiento de ambos tipos de hormigón.



- Para la determinación de armadura de confinamiento el Eurocódigo, el código modelo (CM90) y modelos biela-tirante para zona de anclaje avalados por la práctica (CALA99).

Se decidió fabricar elementos pretensados con dos o más cordones de pretensado excéntricos alineados, a ser preferible tres, con armadura transversal a cortante. Se buscaba hacer posible la manipulación/transporte y evitar el agotamiento por esfuerzo cortante durante el ensayo a flexión. Se dispusieron diferentes cuantías de armadura transversal de confinamiento en forma de cercos.

En lo posible, se intentó aislar los efectos de la armadura de confinamiento de los efectos de la armadura de cortante. Para ello se dispuso la armadura transversal a cortante en forma de estribos para evitar en lo posible efectos de confinamiento del hormigón.

En los siguientes apartados se procede a describir estos elementos, el proceso de fabricación y los ensayos realizados.

## 9.2. DESCRIPCIÓN DE LAS VIGAS FABRICADAS

### 9.2.1. REQUISITOS QUE HA DE CUMPLIR LA SECCIÓN TRANSVERSAL ADOPTADA

En principio se plantearon una serie de condiciones para abordar el diseño de la sección tipo de las vigas a ensayar:

- Sección rectangular, para aislar los efectos del anclaje de los efectos de la longitud de desarrollo en piezas compuestas con alma-ala(s).
- Tensiones del hormigón tras la transferencia limitadas por

$$0.45f_{c,j} \leq \sigma_c \leq \alpha_{ct}f_{ct,j}$$

donde:

- $f_{c,j}$  resistencia a compresión del hormigón, a la edad de transferencia  $j$
- $\alpha_{ct}$  coeficiente de cansancio del hormigón a tracción
- $f_{ct,j}$  resistencia a tracción a la edad de transferencia

para evitar que se produjese fisuración instantánea y diferida debido al pretensado.

- Pretensado consistente en varios cordones de pretensado contiguos, preferiblemente tres o más, con la separación empleada en las vigas comerciales, para simular las condiciones reales de trabajo de los cordones en una viga.
- Recubrimientos mínimos para la armadura pasiva establecidos por el Eurocódigo para hormigón ligero y convencional.

- Sección transversal dúctil, tanto para los elementos de HL como para las vigas de HC, para garantizar la plastificación del pretensado inferior en el estado de prerrotura, en las secciones centrales de la viga en las que el pretensado esté suficientemente anclado.
- Longitud total de las vigas suficiente para garantizar el anclaje del pretensado inferior en la zona central de la viga.
- A ser posible, cordones de pretensado en posición de adherencia II (desfavorable), para lo cual, según lo establecido en la EHE (EHE98), la distancia al paramento superior no debería exceder 30 cm, lo que limitaría el canto total a 35 cm.
- Proceso de fabricación, curado y transferencia similar al de las vigas comerciales.

### 9.2.2. ALTERNATIVAS CONSIDERADAS DE SECCIÓN TRANSVERSAL

Se hizo un estudio bibliográfico de las secciones tipo adoptadas en investigaciones anteriores (véase Capítulo 2):

- Sección rectangular con un solo cordón de pretensado excéntrico (ROSE97).
- Secciones en T, con dos cordones de pretensado en la parte inferior (WEER91). La viga se ensayaba a flexión apoyada en ambos extremos del ala, a fin de aislar los efectos del apoyo de los efectos derivados del anclaje del pretensado.
- Secciones en doble T, vigas AASHTO tipo I y II con cordones inferiores múltiples (de 5 a 9 cordones de pretensado distribuidos en tres filas) (CHON91).

En la bibliografía consultada no se encontraron referencias a ensayos con vigas de sección rectangular con tres o más cordones de pretensado inferiores.

Se adoptó la sección rectangular para evitar efectos secundarios (rasante ala-alma). La ductilidad de la sección se garantizaría disponiendo armadura pasiva/activa en la parte de la sección que estuviese comprimida durante el ensayo a flexión. Siguiendo los criterios del apartado anterior, se dimensionaron las secciones transversales de la Tabla 9.2.2-1.

### 9.2.3. CRITERIOS DE DISEÑO DE LAS VIGAS

En este apartado se precisan los criterios que se tuvieron en cuenta a la hora de diseñar las vigas:

- El pretensado se dimensionó para que, tras la transferencia de pretensado, las tensiones de tracción de la parte superior de la sección no sobrepasen la resistencia a tracción diferida del hormigón a la edad de transferencia. Para ello se ha ponderado la resistencia a tracción instantánea con el coeficiente de cansancio a tracción medio de cada material (véase el Apartado 2.3.3.4), a fin de reducir al máximo la probabilidad de aparición de fisuras.



Tabla 9.2.2-1

	Sección tipo A	Sección tipo B
S E C C I Ó N		
	20×40 cm	15×35 cm
	3 cordones inferiores de pretensado, y uno superior	2 cordones inferiores de pretensado, y uno superior
V E N T A J A S	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilidad de manipulación y transporte.</li> <li>• Rotura dúctil a flexión.</li> <li>• Separación entre cordones habitual en fábrica (50 mm entre centros).</li> <li>• Sección parecida a la de vigas comerciales.</li> <li>• Recubrimientos mínimos de la armadura pasiva acorde con EHE.</li> <li>• Cordón de pretensado superior en posición II de adherencia (EHE98).</li> <li>• Posibilidad de estudiar además la longitud de transmisión del cordón superior.</li> <li>• Recubrimiento del pretensado de 60 mm al igual que en fábrica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilidad de manipulación y transporte.</li> <li>• Rotura dúctil a flexión.</li> <li>• Cordones inferiores en posición II (EHE98).</li> <li>• Separación entre cordones habitual en fábrica (50 mm entre centros).</li> <li>• Sección parecida a la de vigas comerciales.</li> <li>• Recubrimientos mínimos de la armadura pasiva acorde con EHE.</li> <li>• Cordón de pretensado superior en posición II de adherencia (EHE98).</li> <li>• Posibilidad de estudiar además la longitud de transmisión del cordón superior.</li> <li>• Recubrimiento del pretensado de 60 mm al igual que en fábrica.</li> </ul>
I N C O N V E N I E N T E S	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cordones inferiores en posición I (EHE98).</li> <li>• No se aíslan los efectos de anclaje respecto a los de peso propio.</li> <li>• Tras la transferencia se generan tensiones de tracción moderadas en la parte superior de la sección, en ningún caso superiores a la resistencia a tracción diferida estimada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se aíslan los efectos de anclaje respecto a los de peso propio.</li> <li>• Tras la transferencia se generan tensiones de tracción moderadas en la parte superior de la sección, en ningún caso superiores a la resistencia a tracción diferida estimada.</li> <li>• Tan sólo hay dos cordones de pretensado inferiores.</li> </ul>

- Además se dimensionó armadura pasiva longitudinal en la zona superior de la sección, para limitar la apertura de fisuras, en caso de que llegase a producirse fisuración tras la transferencia. Para ello se siguieron las recomendaciones de la ACI (ACIC99, 18.4.1). Además esta armadura pasiva longitudinal contribuye a ductilizar la sección durante el ensayo a rotura, puesto que aumenta considerablemente la capacidad resistente de la cabeza comprimida de la sección durante el servicio.
- Se calcularon el pretensado inferior y superior, y la armadura pasiva adicional necesaria para garantizar rotura dúctil de la sección.

- Era fundamental garantizar que las únicas formas de rotura de cualquier sección fuesen: a flexión en la zona interior de la viga, o por fallo de anclaje de las armaduras activas en la zona de anclaje. Para ello era necesario efectuar un dimensionamiento adecuado de la sección y armadura pasiva necesaria.
- Se dimensionó la armadura transversal y longitudinal complementaria necesarias para evitar el agotamiento prematuro de la viga a cortante. Para ello se tuvo en cuenta la fuerza de pretensado anclada en cada sección y, por lo tanto, la contribución de la armadura activa para resistir esfuerzos tangenciales (E21193).
- Dimensionamiento de la armadura pasiva de la zona de anclaje para evitar fisuración debida a los efectos locales que genera el pretensado, mediante modelos biela-tirante (CALA99).
- Se dimensionaron placas de reparto para evitar que se produjese aplastamiento local en las secciones de aplicación de la carga y en los apoyos extremos durante los ensayos a flexión. Dado el acabado irregular de la superficie superior de las vigas, sobre todo las de hormigón ligero, se decidió además refrentar con mortero de alta resistencia autonivelante la zona de aplicación de las cargas concentradas. De esta forma se regularizaría la superficie para evitar concentraciones de tensiones.
- Se intentaba que el canto útil de la viga, referido a la armadura activa, no sobrepasase 30 cm, para así disponer los cordones de pretensado inferior en posición II (EHE98). Esto no era posible con tres cordones de pretensado, aunque sí con dos. El empleo de tres cordones de pretensado inferior conducía a una sección de 40 cm de canto total. Considerando una longitud de vano de ensayo de 8 metros, la esbeltez de cada sección tipo (Tabla 9.2.2-1) aparece reflejada en la Tabla 9.2.3-1:

Tabla 9.2.3-1

	Sección tipo A	Sección tipo B
$\frac{l_0}{h}$	20	23

siendo  $l_0$  la luz entre apoyos y  $h$  el canto total de la sección.

- En estos ensayos se mantuvo constante el resto de los parámetros de ensayos anteriores: dosificación de hormigón, tipo y partida del cordón de pretensado (misma bobina), fuerza de tesado por cordón... Las condiciones de fabricación se ajustaron, al igual que el resto de los ensayos a la procedencia habitual en fábrica.
- Se dispondría en todas las vigas fabricadas la armadura pasiva que resultase de los cálculos de las vigas de HL (caso más desfavorable). Este material presenta menor resistencia a tracción que el HC, por lo que las exigencias referentes a cuantías de armado, longitudes de anclaje y solapo, radios de doblado de armaduras, ... serán las que recomienda el Eurocódigo (E21496).
- Determinación de la longitud total de la viga, de al menos el doble de la longitud de anclaje estimada, más una zona central de longitud suficiente para garantizar que se produjese la distribución plana de tensiones normales en las secciones de la zona



central. Así tendríamos en la zona central un estado de flexión pura. Para ello se estimó la longitud de anclaje de ambos materiales según lo establecido por la EHE, el código modelo (CM90) y la normativa ACI para hormigón convencional (ACIC99). No se dispone de resultados de otros autores para cordones de pretensado de 15.2 mm anclados en hormigón ligero.

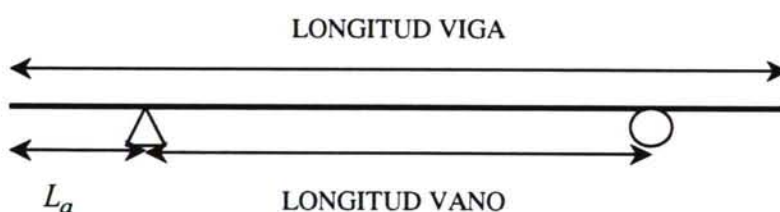
Esta condición se puede expresar como:

$$L > 2l_{bpd,HL} + 2l_p$$

- $L$  longitud total de la viga  
 $l_{bpd,HL}$  longitud de anclaje estimada para las vigas de hormigón ligero  
 $l_p$  longitud de desarrollo de las cargas puntuales aplicadas

Se decidió adoptar una longitud total de las vigas de 9 metros, en la hipótesis de que la longitud de anclaje no superase los 4 metros, más un metro entre cargas puntuales aplicadas para conseguir en la sección central una distribución plana de tensiones normales.

- Se estimó la distancia entre el extremo de las vigas y la sección de apoyo para evitar:
  - El agotamiento a cortante de la sección de apoyo.
  - La fisuración del pequeño voladizo resultante a cada lado del apoyo.



$L_a$  distancia desde el extremo de la viga al centro de gravedad del apoyo más próximo

- La longitud adoptada desde cada extremo de la viga al centro de gravedad del apoyo contiguo (para transporte, almacenamiento y ensayo de vigas) fue de 0.6 m, lo que se ajusta a las condiciones reales (los apoyos de las vigas comerciales se suelen centrar a una distancia de aproximadamente 0.5 a 0.6 metros desde los extremos).
- Era necesario evitar los efectos de inestabilidad lateral de la viga durante el ensayo. Para ello se comprobaron las secciones diseñadas, con la longitud de vano de ensayo (PÁEZ89), y se diseñaron dispositivos de apoyo de las vigas y de aplicación de cargas, a fin de garantizar que las cargas aplicadas estuviesen perfectamente centradas respecto a la sección transversal.
- La armadura en cabeza superior debía garantizar la ausencia de fisuración por exfoliación. Se determinó a partir de los MBT avalados por la práctica (CALA99).

- La armadura transversal debía garantizar la ausencia de fisuración por hendimiento/estallido proporcionando mayor confinamiento (CALA99, CM90).

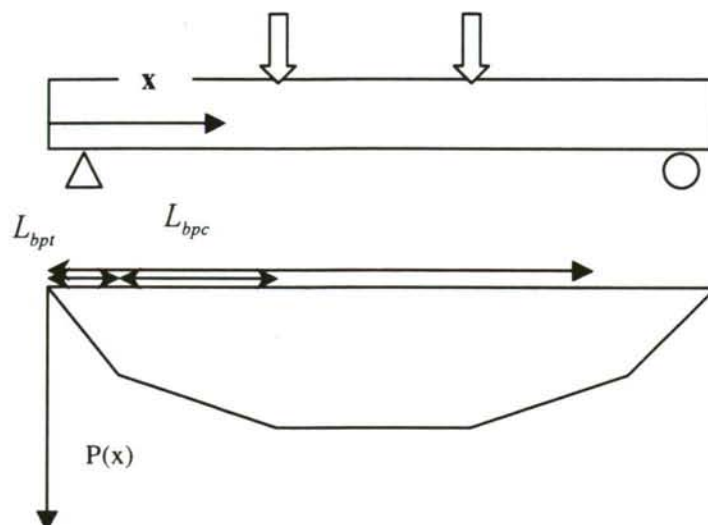


Figura 9.2.3-1

- Los valores de separación libre entre cordones y recubrimiento neto adoptados en fábrica, que se emplearon en la fabricación de estas vigas, fueron los de la Tabla 9.2.3-2 (véase la Fotografía 9.2.4-3).

Tabla 9.2.3-2

Separación libre fábrica	Recubrimiento fábrica
mm	mm
32.8	42.4

Se decidió fabricar tres vigas de cada cuantía de armadura de confinamiento, en una bancada de 120 metros de longitud.

En función de los resultados de la primera serie, se plantearía una segunda de vigas del hormigón convencional de referencia, y algunas vigas de hormigón ligero con la armadura de confinamiento que hubiese resultado más eficaz, para contrastar el comportamiento de ambos materiales.

#### 9.2.4. DISCUSIÓN DE LA SECCIÓN ADOPTADA. COMPARACIÓN CON ELEMENTOS REALES

Teniendo en cuenta los criterios anteriores, pasamos a discutir entre las alternativas de sección transversal (secciones A y B) para la fabricación de las vigas.

- El que los cordones de pretensado inferiores estén en posición I de adherencia, en grandes prefabricados se produce en gran parte de la longitud de anclaje. En los extremos de las grandes piezas se suele macizar parte de la sección a lo largo de una distancia del orden de metro y medio, para aumentar la resistencia a cortante de los extremos. A lo largo de esta distancia (véase Fotografía 9.2.4-1), los cordones inferiores distan más de 30 centímetros de la cara superior por lo que, según la EHE, están en posición I, favorable a adherencia.



- Además, el cordón superior de pretensado de las secciones tipo A y B está en posición II de adherencia, lo que permite evaluar las propiedades en la zona de transmisión de este tipo de pretensado, habitual en grandes prefabricados (ver Fotografías 9.2.4-2 y 9.2.4-4).



*Fotografía 9.2.4-1: Macizado en el extremo de viga artesana (fábrica de Norpresa). Vista del anclaje del pretensado en la bancada*



*Fotografía 9.2.4-2: Momento de la transferencia de pretensado*



*Fotografía 9.2.4-3: Separación entre las cuñas de anclaje*



*Fotografía 9.2.4-4: Anclaje de cordones de pretensado superiores en la bancada. Separación entre cordones superiores*

El pretensado inferior consistente en tres cordones de pretensado posibilita estudiar los efectos de los cordones adyacentes sobre el cordón central. La proximidad entre cordones parece desfavorable a priori, porque previsiblemente la zona de adherencia del cordón central se verá alterada por los cordones laterales (DENU91). De esta forma, disponiendo al menos tres cordones alineados horizontalmente se puede estudiar la influencia de la proximidad de los cordones inferiores laterales sobre el cordón inferior central, y las propiedades de la zona de transmisión de cordones situados en la parte inferior y superior de la sección.

Valorando las ventajas e inconvenientes de cada sección transversal tipo, se optó por la sección tipo A, que consta de cuatro cordones de pretensado: tres inferiores, con los recubrimientos y separación empleadas habitualmente en fábrica, en posición I respecto a adherencia, y un cordón superior, en posición II respecto a adherencia.

## 9.2.5. DISEÑO Y DESPIECE DE LAS VIGAS

### 9.2.5.1. Definición de las vigas pretensadas

Para determinar el efecto de diferentes cuantías de armadura de confinamiento en la zona de transmisión, se diseñó una primera serie de vigas pretensadas del hormigón ligero de peores prestaciones HL10-1, con diferentes cuantías de armadura de confinamiento.

Tras la fabricación de las vigas se iban a conocer las propiedades de la zona de transmisión, y los efectos de las diferentes cuantías de la armadura de confinamiento sobre la tendencia a la fisuración por hendimiento. De esta forma, se podrían seleccionar las configuraciones de armadura de confinamiento que hubiesen demostrado ser más efectivas en la prevención de propagación de fisuras en la zona de anclaje.

Se decidió fabricar al menos tres vigas con cada cuantía de armadura de confinamiento:

- Una viga para ensayar con carga centrada creciente hasta rotura.
- Una viga para ensayar con carga creciente, situada a una distancia determinada desde al apoyo, para intentar acotar superiormente la longitud de anclaje de pretensado.
- Una viga para estudiar la evolución de la longitud de transmisión con el tiempo.

### 9.2.5.2. Descripción de las vigas propuestas. Despiece de las armaduras

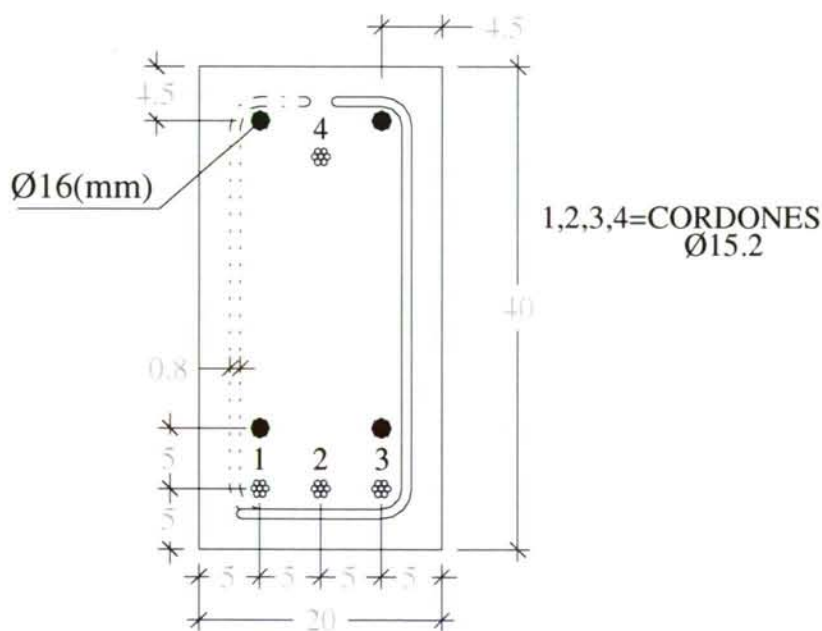


Figura 9.2.5.2-1: Sección transversal de la viga



Tabla 9.2.5.2-1

Concepto		Unidades	Valor adoptado
Ancho viga	$b$	(cm)	20
Canto total	$h$	(cm)	40
Armadura pasiva superior	$A_{ss}$	(cm <sup>2</sup> )	4.0
Armadura pasiva longitudinal a cortante	$A_{si}$	(cm <sup>2</sup> )	4.0
Pretensado inferior	$A_{pi}$	(cm <sup>2</sup> )	1.4
Pretensado superior	$A_{ps}$	(cm <sup>2</sup> )	4.2
Canto útil pretensado inferior	$d_{pi}$	(cm)	35
Distancia desde c.d.g. $A_{ss}$ a paramento superior	$d_{ss}$	(cm)	5
Distancia desde c.d.g. $A_{ps}$ a paramento superior	$d_{ps}$	(cm)	7.5
Distancia desde el extremo de la viga al centro de gravedad del apoyo más próximo	$La$	(m)	0.6
Distancia desde extremos a armadura suspensión $A_{sus}$	$l_s$	(m)	1.5
Longitud total viga	$L$	(m)	9.0
Longitud vano ensayo flexión	$l_0$	(m)	7.8
Armadura transversal a cortante (véanse Figura 9.2.5.2-1 y Fotografía 9.2.5.2-2)	$A_t$	2 estribos 8 a 20 (alternos)	5.03
Armadura de confinamiento $A_1$	c6a10	cercos $\phi 6$ a 10	2.83 cm <sup>2</sup> /m
Armadura de confinamiento $A_2$	c6a15	cercos $\phi 6$ a 15	1.88 cm <sup>2</sup> /m
Armadura de confinamiento $A_3$	c8a20	cercos $\phi 8$ a 20	2.51 cm <sup>2</sup> /m
Armadura de confinamiento $A_4$	c8a15	cercos $\phi 8$ a 15	3.35 cm <sup>2</sup> /m

### Radios de doblado y longitudes de anclaje

Se adoptaron los radios mínimos de doblado de las armaduras que establece el Eurocódigo, para hormigón ligero (E21496), y las longitudes de anclaje de armaduras correspondientes, para el despiece de la ferralla.

Tabla 9.2.5.2-2

Diámetro armadura	Diámetro mínimo de doblado (E21496)	Diámetro de mandril	Longitud de anclaje recta	Longitud de anclaje patilla (si el recubrimiento normal a plano doblado es $> 3\phi$ mm)
mm	mm	mm	mm	mm
6	31.2	33	159	111
8	41.6	45	212	148
10	52	55	265	186
12	62.4	65	318	223
16	83.2	85	424	297

### Alzado y planta de la armadura (Figuras 9.2.5.2-1 y 9.2.5.2-2)

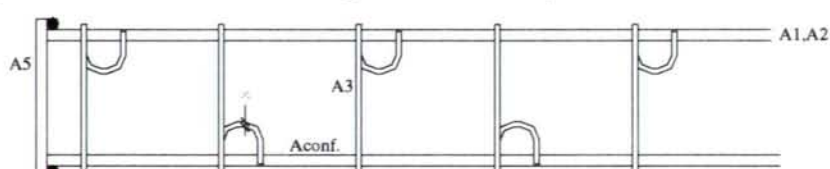


Figura 9.2.5.2-1: Disposición en planta de la armadura de las vigas



UNIVERSIDAD DE LA CORUÑA  
E.T.S. INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS  
Departamento de Tecnología de la Construcción



**ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES  
DE ADHERENCIA DE CORDONES DE PRETENSADO  
EN ELEMENTOS PREFABRICADOS DE HORMIGONES  
DE ALTAS PRESTACIONES INICIALES**

*Trabajo realizado como requisito para obtener el grado de  
Doctor, por:*

***Cristina Vázquez Herrero***

*Directores:*

***Fernando Martínez Abella  
Manuel Casteleiro Maldonado***

*A Coruña, Diciembre de 2000*



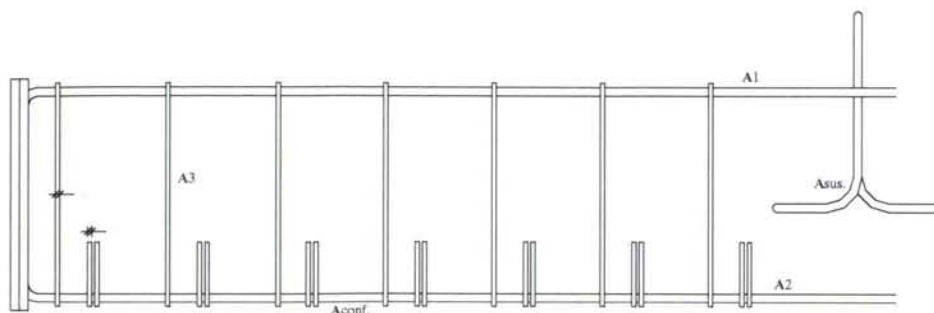


Figura 9.2.5.2-2: Alzado de la armadura de las vigas

### Armadura de confinamiento

Se dispusieron cuatro configuraciones de armadura de confinamiento diferentes en la primera serie, a lo largo del primer metro y medio desde los extremos de la viga. Dada la fisuración de hendimiento de todas las vigas fabricadas, se decidió disponer en la segunda serie la configuración de cuantía máxima de la primera puesta, cercos de 8 a 15 cm.

Para facilitar su colocación, se despiezó la armadura en forma de medios cercos atados, alrededor del pretensado (véase Fotografía 9.2.5.2-4).

### Armadura pasiva en anclaje

Para evitar que se produjese fisuración por estallido, en las caras frontal y dorsal de las vigas, acorde con el modelo biela tirante habitual en la zona de anclaje, se dispuso un cerco de  $\phi 10$  mm, despiezado como dos semicercos, lo más próximo posible de las caras antedichas, respetando recubrimientos mínimos (véanse Fotografías 9.2.5.2-1 y 9.2.5.2-3).

### Armadura de suspensión

Se dispusieron dos ganchos de suspensión por viga, situados a 1.5 metros desde los extremos, para el transporte de las vigas (véase Fotografía 9.2.5.2-4).

### Fotos de la armadura pasiva



Fotografía 9.2.5.2-1: Extremos de viga. Planta



Fotografía 9.2.5.2-2: Armadura en la zona central



Fotografía 9.2.5.2-3: Armadura en extremos.  
Alzado



Fotografía 9.2.5.2-4: Armadura de suspensión.  
Instrumentación de armadura activa y pasiva

### 9.3. INSTRUMENTACIÓN EMPLEADA DURANTE LA FABRICACIÓN Y ENSAYO DE LAS VIGAS

Para la realización de los ensayos de determinación de la longitud de transmisión en las vigas objeto de estudio, se ha contado con los siguientes equipos de instrumentación:

- A. Sistema de adquisición de datos estático, System5000, con capacidad de hasta 1200 canales. Para estos ensayos se han utilizado 70 canales extensométricos.
- B. Células de carga huecas, en total 4, de la marca Sensotec, con 330 kN de capacidad, alimentadas por un voltaje de 10 voltios. Estas células de carga se colocan entre las cuñas de anclaje y la placa de anclaje, en los anclajes de la bancada de pretensado, con objeto de conocer antes, durante y tras la transferencia la tracción a que estaba sometido el cordón de pretensado. El acoplamiento de la célula con la cuña de anclaje se hace mediante una pieza diseñada específicamente para encajar perfectamente entre ambas, y de esta forma asegurar la transmisión de la carga centrada a la célula.
- C. 2 transductores potenciométricos de desplazamiento, de 11.0 mm de recorrido y 5 de 50 mm de recorrido, de la marca Apek, sujetos al cable mediante pinzas elásticas y apoyados en las caras dorsal y frontal de la viga respectivamente, con objeto de determinar en cada momento de la transferencia de pretensado la penetración del cable dentro del hormigón. El voltaje medio de alimentación de estos potenciómetros resistivos es de 10 voltios.
- D. Galgas extensométricas de la marca TML, PL-60 y PL-90, de 60 o 90 mm de longitud. Estas galgas se utilizaron para medir las deformaciones superficiales del hormigón. El adhesivo utilizado para estas galgas es cianocrilato sobre base de poliéster. La fuente de alimentación de las galgas suministra un voltaje medio de 5 voltios. La forma de conexión de las galgas extensométricas se efectúa en cuarto de puente de Wheatstone, con montaje a tres hilos, con el fin de compensar las pérdidas producidas por los cables de conexión.
- E. Galgas extensométricas de la marca MM, modelo EA-125BT-120, que se adhieren con cianocrilato a un alambre del cordón, tras un proceso de preparación de la superficie descrito en este documento, con objeto de determinar la deformación del



alambre durante los ensayos. Puesto que estas galgas debían permanecer en funcionamiento durante meses, se protegieron con un recubrimiento impermeabilizante de aislante M-coat B y una capa de butilo, una vez tesado el cable. La fuente de alimentación de las galgas suministra un voltaje de 5 voltios. La forma de conexión de las galgas extensométricas es en cuarto de puente de Wheatstone, con montaje a tres hilos, con el fin de compensar las pérdidas producidas por los cables de conexión.

- F. Extensómetros mecánicos tipo Demec de 100 mm, 150 mm (ambos de Wykeham Farrance) y 300 mm (de Incotecnic) de longitud base, para la medida de deformaciones. En ambas caras laterales de cada viga, a la altura del centro de del cordón de pretensado, a una distancia de entre 75 mm y 150 mm, según el extensómetro base, se adhirieron discos de extensometría sobre una base de poliéster, el día posterior al hormigonado de la viga, con la finalidad de evaluar las deformaciones del hormigón tras la transferencia y las deformaciones diferidas.

#### 9.4. PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DE LAS VIGAS

En julio de 1999 se fabricaron 12 vigas de hormigón ligero con la dosificación HL10-1, con cuatro configuraciones diferentes para la armadura de confinamiento que rodeaba los cordones de pretensado inferiores. Las vigas se fabricaron en la bancada de placas de Norpresa, en Outeiro de Rei (véanse Fotografías 9.4-1 a 9.4-3).

En todas las vigas fabricadas se observó la aparición de fisuras de hendimiento. Parte de las vigas fisuraron durante la primera semana desde la transferencia. Al cabo de dos meses se apreciaba fisuración longitudinal en todas las vigas. La anchura de estas fisuras estaba comprendida entre 0.1 y 0.2 mm.

La fisuración por hendimiento se inició en los extremos de la viga, en la cara inferior. Las fisuras paulatinamente se fueron propagando hasta alcanzar la totalidad de la longitud de la viga al cabo de varios meses, hecho por el cual se decidió finalmente modificar las dosificaciones de hormigón ligero.

Tras varios meses de tanteos se ajustaron las nuevas dosificaciones de hormigón ligero (véase Capítulo 8 para requisitos de la dosificación, y Capítulo 4 para dosificaciones adoptadas). Una vez obtenida una dosificación de HL10-2 que cumplía los requisitos prefijados, en febrero de 2000 se fabricaron 3 vigas de hormigón de la nueva dosificación y 3 vigas de hormigón convencional de referencia en la misma serie, con la cuantía de armadura de confinamiento máxima empleada para las vigas anteriormente fabricadas de HL10-1 (cercos de 8 mm a 15 cm).

Durante la fabricación se instrumentó:

- La fuerza de pretensado en ambos anclajes hasta la transferencia de pretensado, mediante células de carga.
- Las deformaciones de los cordones de pretensado, mediante 12 galgas extensométricas adheridas a lo largo de cada viga, 10 en los cordones inferiores y 2 en el cordón superior.



- Las deformaciones en el hormigón, a la altura del pretensado superior e inferior, mediante discos de extensometría, en ambos extremos de cada viga (véase Figura 9.4-4).
- Las deformaciones del hormigón tras la transferencia en la zona central, mediante galgas extensométricas adheridas a la superficie de las vigas.
- La penetración de los cordones de pretensado en las caras frontal y dorsal de las vigas durante la transferencia, mediante transductores de desplazamiento resistivos.



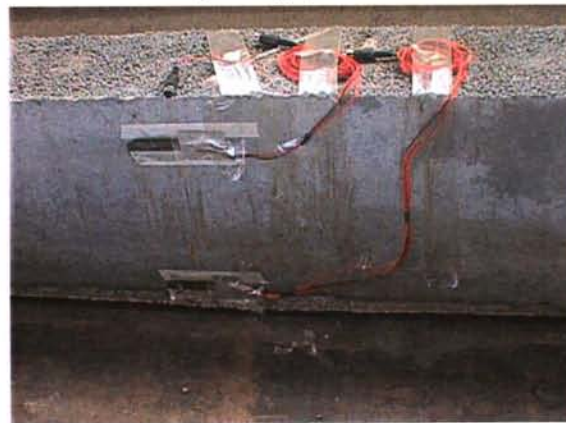
Fotografía 9.4-1: Anclaje activo de la bancada



Fotografía 9.4-2: Vista general de la bancada y anclaje pasivo



Fotografía 9.4-3: Extremo de una viga tras la transferencia



Fotografía 9.4-4: Bandas extensométricas adheridas a la superficie de hormigón

## 9.5. DETERMINACIONES REALIZADAS DURANTE LA FABRICACIÓN DE LAS VIGAS

Antes de la transferencia de pretensado se colocaron discos de extensometría pegados a lo largo de cierta distancia desde los extremos de la viga, a la altura del pretensado superior y del pretensado inferior, para tomar medidas de referencia mediante los extensómetros Demec antes de la transferencia.

Con anterioridad a la transferencia se colocaron transductores de desplazamiento sujetos a cada cordón de pretensado mediante pinzas elásticas, apoyados en las caras frontales de dos vigas, una a cada lado del corte, para medir la penetración del cordón.



También se conectaron las bandas extensométricas de las dos vigas adyacentes a la zona de corte, tanto las del pretensado como las del hormigón, para medir las deformaciones instantáneas durante la transferencia.

Durante la transferencia también se mantuvieron conectadas las células de carga de los anclajes de la bancada.

Inmediatamente después de la transferencia, se tomaron medidas, para determinar las deformaciones instantáneas del hormigón al transferir a lo largo de la viga, y así poder determinar la longitud de transmisión del pretensado superior y del pretensado inferior.

Antes de proceder a la transferencia se ensayaron probetas en la fábrica para comprobar que las resistencias eran suficientes. Estos ensayos determinaron la edad de transferencia, de 2 días para la primera puesta y de 3 días para la segunda (las resistencias a tracción fueron insuficientes a las 48 horas).

Al mismo tiempo que se produjo la transferencia, se ensayaron en el Laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la ETSICCP probetas de las amasadas, para determinar:

- Resistencia a compresión en probeta cilíndrica normalizada.
- Resistencia a compresión en probeta cúbica 10×10×10 cm.
- Resistencia a tracción indirecta (ensayo brasileño) en probeta normalizada.
- Módulo de deformación secante a la edad de transferencia

En el Laboratorio de Cementos Cosmos se determinó, además, la resistencia a tracción directa.

Estos mismos parámetros se determinaron a la edad de 28 días, en el Laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la ETSICCP, y en el de Cementos Cosmos, a fin de evaluar las características de proyecto y la capacidad resistente de las vigas.

Una vez trasladadas las vigas al Laboratorio del CITEEC, se colocaron apoyadas en apoyos deslizantes (probetas de hormigón cilíndricas), a 60 cm de los extremos (Fotografías 9.5-1 y 9.5-2), a fin de no coartar las deformaciones longitudinales de la viga. Entre el apoyo deslizante y la viga se colocaron placas de acero para distribuir la reacción del peso propio de la viga. Uno de los apoyos se inmovilizó con cuñas de madera, como dispositivo de seguridad para evitar movimientos de las vigas.

*Fotografía 9.5-1: Apoyo articulado**Fotografía 9.5-2: Apoyo deslizante*

De esta forma, las vigas quedaban apoyadas a una distancia del suelo de 17 centímetros, lo que posibilita la inspección de todas las caras de la viga, para detectar posibles fisuras.

Para detectar las fisuras no visibles, se procedía humedeciendo las superficies de hormigón con acetona, que se evapora rápidamente, excepto en las zonas donde existen fisuras, donde tarda más en evaporar, revelando de esta forma el trazado de las fisuras no visibles. Durante las primeras semanas tras la fabricación, se efectuaba una inspección diaria para detectar e identificar posibles nuevas fisuras y seguir la evolución de las existentes.

Se tomaron medidas de la longitud de transmisión a los 7 días de la transferencia, a 28 días, y a 2, 6 y 12 meses del hormigonado.

## **9.6. ENSAYO DE DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS VIGAS A CARGA CRECIENTE**

### **9.6.1. INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPOS PARA EL ENSAYO A ROTURA DE LAS VIGAS**

Las vigas se ensayaron a flexión, aplicando dos cargas concentradas simétricas respecto a centro luz, a la distancia de los apoyos fijada. Para ello se diseñó un pórtico de ensayos portátil, que se anclaba en la losa de carga, al que se le fijó el gato de aplicación de la carga, de 500 kN de capacidad. Los primeros ensayos se realizaron con dos gatos de 75 mm de carrera, colocados en serie. En las últimas vigas ensayadas se reemplazaron estos gatos por un único gato de 250 mm de carrera (Fotografía 9.6.1-2).

La fuerza aplicada por el gato se transmitía a la viga mediante una viga de reparto metálica. Los apoyos de la viga de reparto, una articulación y un aparato deslizante, se aprecian en las Fotografías 9.6.1-3 y 9.6.1-4.

La viga ensayada se apoyaba en aparatos deslizantes, debajo de los cuales estaban situadas las células de carga que controlaban las reacciones de apoyo. Inicialmente los apoyos se situaban directamente en la losa de carga, pero por el peligro de vuelco se



diseñaron y fabricaron unas protecciones laterales portátiles, que se observan en las Figuras 9.6.1-1 y 9.6.1-6.

Además de la instrumentación descrita empleada durante la fabricación de las vigas (véase Fotografía 9.6.1-7), se ha empleado durante el ensayo a flexión:

- Células de carga, de 600 kN de capacidad, sobre las que estaban apoyados los aparatos de apoyo deslizantes sobre los que descansaba la viga. Esto permitió conocer el peso propio exacto de las vigas y las reacciones de apoyos durante todo el ensayo. Esto constituía una medida más de seguridad, además del control de la presión de aceite aplicada al gato, por la central hidráulica (Fotografía 9.6.1-6).
- Un transductor de desplazamiento potenciométrico se empleaba para medir la flecha de la viga en centro luz a lo largo del ensayo.
- Un transductor de desplazamiento magnetostrictivo, conectado al sistema de adquisición de datos del servosis, para la medida redundante de flecha en centro luz.
- Seis transductores de desplazamiento potenciométricos, en este caso, se utilizaban para medir el posible deslizamiento de las armaduras activas traccionadas durante el ensayo, y poder así determinar el tipo de rotura.
- Antes del ensayo se colocaron galgas extensométricas en la superficie de hormigón, en la zona de máximos momentos flectores, con el fin de determinar las deformaciones y curvaturas de las secciones más significativas durante el ensayo (véase Fotografía 9.6.1-7).



*Fotografía 9.6.1-1: Protecciones laterales y apoyos de la viga ensayada*



*Fotografía 9.6.1-2: Pórtico de ensayo portátil, actuador hidráulico*



*Fotografía 9.6.1-3: Apoyo de la viga de reparto deslizante, cadenas de seguridad*



*Fotografía 9.6.1-4: Apoyo articulado metálico con cadenas de seguridad*



*Fotografía 9.6.1-5: Equipo de instrumentación y central hidráulica*



*Fotografía 9.6.1-6: Apoyo deslizante de las vigas durante el ensayo, y célula de carga inferior*



*Fotografía 9.6.1-7: Bandas extensométricas en el paramento lateral de la viga y discos de extensometría*

### **9.6.2. CAPACIDAD RESISTENTE TEÓRICA DE LAS VIGAS: DIAGRAMA MOMENTO-CURVATURA DE UNA SECCIÓN CENTRAL HASTA ROTURA**

Como se explicó anteriormente en este capítulo, la sección transversal de las vigas se diseñó para presentar un comportamiento dúctil el prerrotura. Para la predicción de la capacidad resistente y modo de rotura de las vigas ensayadas se desarrolló un programa de obtención del diagrama momento-curvatura hasta rotura de una sección genérica sometida a flexión compuesta recta. Este programa permite predecir el comportamiento de una sección central de la viga (donde se cumple adherencia perfecta y planeidad de la sección) a lo largo de la fase I, sin fisuración, fase II fisurada y fase III en prerrotura.

El programa desarrollado permite considerar diagramas tensión-deformación genéricos para todos los materiales constituyentes de la sección (armaduras activa y pasiva, y hormigón), definidos por puntos. Los datos son las características geométricas de la sección, las relaciones tenso-deformacionales de los materiales constituyentes, el axil actuante en la sección y su punto de aplicación (en nuestro caso la fuerza de neutralización y punto de aplicación de la misma dentro de la sección). El algoritmo empleado está descrito en el Anexo 5. De esta forma se obtiene el momento último



nominal de la sección y la forma de rotura, a partir del estado tensional de los componentes de la sección en prerrotura.

Antes de ensayar una viga interesaba conocer, para diseñar el ensayo y por motivos de seguridad, la capacidad resistente nominal de la misma. A la edad de ensayo, para diagnosticar el tipo de rotura previsible de una viga se determinaban experimentalmente ciertas propiedades del hormigón a la edad de ensayo. Esto se hacía a partir de probetas de la misma amasada, conservadas en las mismas condiciones, obteniéndose el diagrama tensión-deformación, la resistencia a compresión en probeta cilíndrica, la resistencia a tracción indirecta y el módulo de deformación. Se estimaba además la resistencia a tracción, y los valores de la fuerza de pretensado superior e inferior a la edad de ensayo.

En el siguiente capítulo se comparan los diagramas momento-curvatura teóricos con los experimentales obtenidos durante el ensayo de las vigas en la zona central (entre puntos de aplicación de la carga). De esta forma se puede diagnosticar la forma de rotura de la viga, a partir de la comparación de los valores de momento de fisuración, momento último y curvatura última experimentales y teóricos.

Si el momento último registrado durante el ensayo de la viga es menor que el momento último nominal, se habrá producido la rotura prematura por otras causas diferentes de la flexión (adherencia, cortante, torsión, inestabilidad lateral,...). Si por el contrario el momento máximo registrado es superior al momento nominal, el pretensado, aún cuando haya deslizado, se considera suficientemente anclado.

## Capítulo 10

# ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LAS VIGAS

### 10.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos de las vigas fabricadas, relativos a:

- Pérdidas de pretensado.
- Estimación de la medida de la longitud de transmisión, a partir de las medidas de los extensómetros mecánicos.
- Análisis de los ensayos hasta rotura de las vigas.
- Diagnóstico del tipo de rotura de las vigas y acotación de la longitud de anclaje.

Las características del pretensado, empleadas para realizar los cálculos teóricos, y las estimaciones de tensión están reflejados en el Capítulo 4, Tablas 4.4-1 y 4.4-2.

A continuación se detalla la nomenclatura empleada en este capítulo, y el criterio de signos empleado.

La denominación de las vigas aparece reflejada en la Tabla 10.1-1.

Tabla 10.1-1

Viga	Ordinal de posición en bancada, desde Sur, anclaje activo	Tipo de hormigón	Humedad inicial de la arlita	Dosificación de hormigón ligero
V	"i"	L = ligero	10 = HL10	-1 = dosificación inicial
		C = convencional		-2 = dosificación final

Por ejemplo:

- V4C      Viga de hormigón convencional, cuarta viga desde el extremo Sur de bancada.
- V3L10-2      Viga de hormigón ligero HL10-2, tercera desde el extremo Sur de la bancada.

En la Tabla 10.1-2 se detalla la nomenclatura de la instrumentación.

La curvatura de la viga se determina en las secciones instrumentadas con tres bandas a diferentes alturas desde la cara superior: 75, 150 y 350 mm. Se efectúa la determinación del coeficiente  $R$ , para evaluar la linealidad de las deformaciones (positivas a tracción) de la sección (véanse la Figura 10.1-1 y la Fotografía 10.1-1).



Tabla 10.1-2

$ue = 10^{-6}$	Microdeformación
Sur (S)	Anclaje activo de la bancada de pretensado
Norte (N)	Anclaje pasivo de la bancada de pretensado
$x$	Distancia desde extremo Sur de la viga a la sección transversal considerada
CC	Célula de carga en anclaje de la bancada
Galga hormigón Este 50 I 350 540	Galga de hormigón, Cara Este a 50 cm aproximadamente desde extremo Sur, inferior, 350 mm desde cara superior, a exactamente 540 mm desde extremo Sur
Galga armadura cortante	Bandas extensométricas situadas longitudinalmente en la armadura transversal a cortante
Galga armadura confinamiento	Bandas extensométricas situadas longitudinalmente en la armadura transversal de confinamiento.
MMÁX / Mmáx	Momento flector máximo a lo largo de la viga
$\epsilon_p$	Deformación longitudinal del cordón de pretensado (véase Apartado 4.4)
$\epsilon_p^*$	Deformación relativa al alambre exterior del cordón de pretensado (véase Apartado 4.4)
Galga pretensado inferior 02 cordón 3 8120	Segunda galga de la viga desde extremo Sur, cordón inferior 3, 8120 mm desde extremo Sur
Coefficiente $R$	El coeficiente del momento de correlación del producto Pearson de una serie "y" respecto a una serie "x"
Coefficiente $R^2$	El cuadrado del coeficiente del momento de correlación del producto Pearson de una serie "y" respecto a una serie "x"

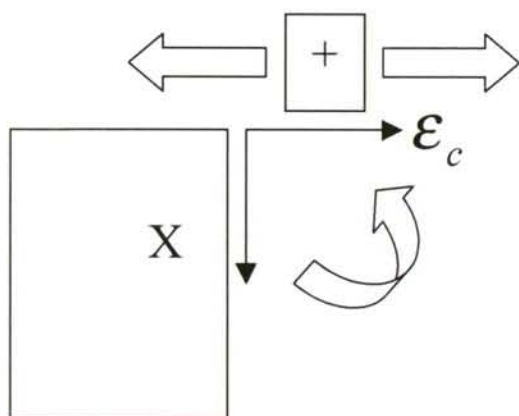


Figura 10.1-1



Fotografía 10.1-1

## 10.2. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA: VIGAS DE LA PRIMERA SERIE

### 10.2.1. DESCRIPCIÓN DE LAS VIGAS FABRICADAS

La primera serie de vigas corresponde a la fabricación de doce vigas pretensadas de hormigón ligero HL10-1, que tuvo lugar en julio de 1999 en la fábrica de Outeiro de Rei, Lugo. La transferencia de pretensado tuvo lugar a los dos días del hormigonado.

En este apartado se resumen las pérdidas de pretensado y los resultados de la instrumentación.

Las cuantías de armadura de confinamiento adoptadas en esta serie están reflejadas en la Tabla 10.2.1-1:

Tabla 10.2.1-1

Denominación	Cuantía (cm <sup>2</sup> /cm)	Descripción
c 6 a 10	2.8	Cercos de 6 mm a 10 cm a lo largo de los primeros 1.5 m desde cada extremo
c 6 a 15	1.9	Cercos de 6 mm a 15 cm a lo largo de los primeros 1.5 m desde cada extremo
c 8 a 20	2.5	Cercos de 8 mm a 20 cm a lo largo de los primeros 1.5 m desde cada extremo
c 8 a 15	3.3	Cercos de 8 mm a 15 cm a lo largo de los primeros 1.5 m desde cada extremo

Un esquema de la posición de las vigas en la bancada se ve en la Figura 10.2.1-1.

Tanto el proceso de tesado como el valor de la fuerza de pretensado son los habituales en fábrica. Se tesó inicialmente a una fuerza de pretensado nominal de 203 kN, lo que equivale al 90% del límite elástico garantizado por el fabricante del pretensado, que cumple las limitaciones de carga unitaria máxima de la EHE.

En esta serie se instrumentó la fuerza de pretensado de los cordones 2 y 4, de los cuatro totales en el terminal activo de la bancada mediante células de carga huecas (CC) (Figura 10.2.1-1). En cada viga, en cordones alternos se dispusieron diez bandas extensométricas (cuatro en cada extremo) en la zona de anclaje prevista, y dos simétricamente situadas en la zona central, a aproximadamente 3.5 metros de los apoyos.

Las galgas se adhirieron antes del tesado, tras haber tesado provisionalmente los cordones a 20 kN aproximadamente. El replanteo de la posición de las bandas se efectuó teniendo en cuenta el desplazamiento previsto para las bandas extensométricas debido al alargamiento del cable.

Se dispusieron galgas en la armadura de confinamiento y en el pretensado superior de varias vigas, pero por falta de tiempo no se tomaron medidas de referencia antes de la transferencia. Esto se corrigió en la segunda serie, en la que se redujo el número de vigas fabricadas a la mitad, lo que posibilitó la intensificación de las medidas en cada viga. A pesar de esto, las galgas de armadura pasiva y de pretensado superior de la primera serie proporcionaron datos durante el ensayo de las vigas a flexión.

Antes de la transferencia se colocaron transductores de desplazamiento para evaluar la penetración del pretensado tras la transferencia. Debido al violento proceso de transferencia, las pinzas elásticas de sujeción de los transductores al cordón se desplazaron, por lo que no se dispuso de medidas de penetración. En la segunda serie se corrigió el procedimiento, gracias a lo cual se determinaron los valores de penetración del pretensado durante la transferencia, como se explica más adelante en este mismo capítulo.



ANCLAJE  
ACTIVO

ZONA DE CORTE

ANCLAJE  
PASIVO

SUR	V1L10-1	V2L10-1	V3L10-1	V4L10-1	V5L10-1	V6L10-1	V7L10-1	V8L110-1	V9L10-1	V10L10-1	V11L10-1	V12L10-1
-----	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	----------	---------	----------	----------	----------

VIGA	VIGA 1	VIGA 2	VIGA 3	VIGA 4	VIGA 5	VIGA 6	ZONA DE CORTE	VIGA 7	VIGA 8	VIGA 9	VIGA 10	VIGA 11	VIGA 12
Material	HL10-1	HL10-1	HL10-1	HL10-1	HL10-1	HL10-1		HL10-1	HL10-1	HL10-1	HL10-1	HL10-1	HL10-1
Armadura de confinamiento	c 6 a 15	c 8 a 20	c 8 a 15	c 6 a 10	c 6 a 15	c 6 a 10		c 8 a 15	c 8 a 20	c 6 a 10	c 6 a 15	c 8 a 15	c 8 a 20
Galgas armadura confinamiento								X	X	X	X		
Galgas pretensado superior	X		X			X							
Viga ensayada						X		X			X	X	X
Instrumentación medidas deformación hormigón	N-S	N-S	N-S	N-S	N-S			S					

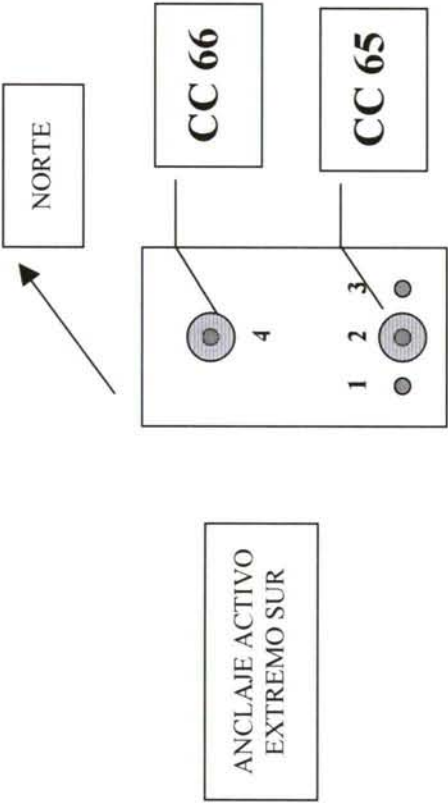


Figura 10.2.1-1

### 10.2.2. PÉRDIDAS DE PRETENSADO ANTES DE LA TRANSFERENCIA

Las pérdidas instantáneas de un cordón de pretensado en la bancada pueden estar motivadas por:

- Pérdidas en el gato/descalibración, que motivan que la fuerza de pretensado inicial sea diferente de la realmente aplicada. Esto realmente no constituye una pérdida, sino una incertidumbre en el valor de la fuerza de pretensado.
- Penetración de cuñas.
- Deformación de la bancada durante el tesado, que afectará a los cordones previamente anclados.

La penetración de cuñas suele variar entre 2 y 7 mm para el sistema empleado, según el fabricante del gato de pretensado (CTT-Stronghold). En nuestro caso conocemos la longitud de cordón de pretensado entre anclajes, y las pérdidas, puesto que tenemos instrumentados todos los cordones de pretensado con galgas extensométricas y, en su caso, con células de carga. Por ello conocemos las pérdidas de pretensado hasta la transferencia con gran precisión.

Según se aprecia en la Tabla 10.2.2-2, el *acortamiento equivalente* que corresponde a las pérdidas instantáneas, deducido con las propiedades del pretensado detalladas en el Apartado 4.4, es muy superior a la penetración de cuñas máxima prevista. Por ello, siendo esta pérdida un hecho constatado durante las dos series realizadas, llegamos a la conclusión de que la pérdida sólo puede estar motivada por un deslizamiento excesivo del pretensado, unido a un desplome de los anclajes por deformación excesiva de la bancada.

La bancada empleada para la fabricación de las vigas se emplea generalmente para fabricar placas. Previamente a la fabricación se realizaron los cálculos de comprobación de la capacidad portante de la misma para hacer frente al tiro de las vigas. De este análisis se concluyó que la bancada tenía suficiente capacidad.

Sin embargo, durante la primera serie se observó un desplome del anclaje activo de aproximadamente 1 cm. Supuesto un valor similar de desplome del anclaje pasivo, y la propia pérdida de penetración de cuñas, resulta un valor de acortamiento del mismo orden de magnitud que el acortamiento equivalente de los cordones durante el tesado.

Respecto a las pérdidas producidas en bancada entre el tesado y la transferencia, éstas pueden ser debidas a:

- Relajación del acero de pretensado.
- Deformaciones diferidas de la bancada de pretensado.
- Deformaciones térmicas de los cordones, que por estar anclados producen variaciones de la fuerza de pretensado: un descenso de temperatura producirá un aumento de tensión, y un aumento de temperatura el efecto contrario. Estas variaciones, registradas a través de las galgas de compensación de pretensado no son despreciables, basta tener en cuenta que una variación de 10 °C puede inducir tensión del orden de 10 a 20 MPa. Este tema está ampliamente estudiado en la bibliografía (CALA99).





Gráfica 10.2.2-1

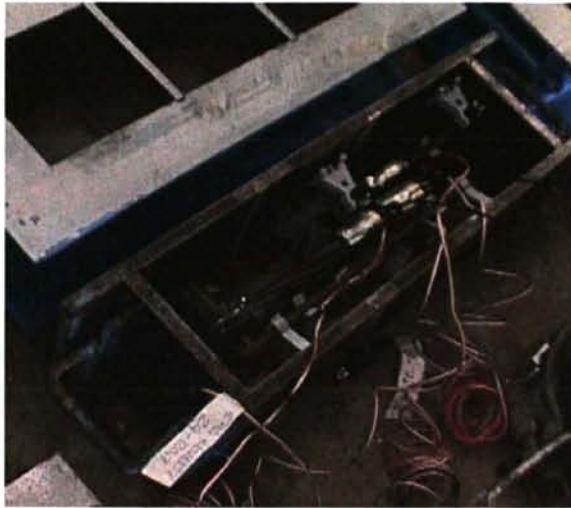
En la Gráfica 10.2.2-1 se observan los valores de deformación experimentados por las galgas de pretensado durante el proceso de tesado. Se puede observar la dispersión de los valores de deformación final de galgas adheridas al mismo cordón de pretensado.

Como se explicó en el capítulo anterior, a lo largo de cada viga y alternando cordones de pretensado inferiores se adherieron diez bandas extensométricas. Durante la fabricación de las vigas y posteriormente, de forma periódica, se tomaron medidas de las bandas para evaluar la fuerza de pretensado.

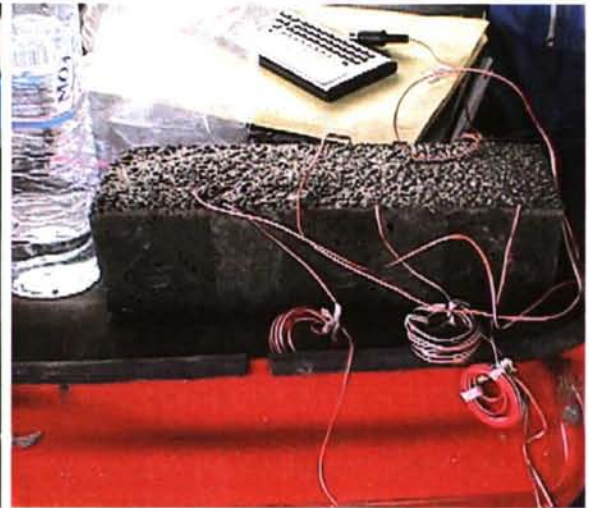
También se dispusieron bandas extensométricas en un trozo de cordón de pretensado, y en armadura pasiva, que se hormigonó dentro de una probeta con hormigón procedente de una de las amasadas, al mismo tiempo que la fabricación de las vigas, a fin de evaluar las variaciones de deformación térmicas durante la fabricación y ensayo de las vigas. Mediante estas bandas se pueden aislar las deformaciones térmicas de las originadas por otros efectos. En bancada, al estar coartada la deformación de los cables de pretensado, las variaciones de temperatura llevan aparejadas variaciones de tensión reales, por lo que estimamos que no se ha de realizar compensación de temperaturas.

Una vez que el pretensado se transfiere a las vigas, la coacción a la libre deformación del pretensado la ejerce el hormigón que lo rodea. Si los coeficientes de dilatación del pretensado y del hormigón fuesen iguales, y el hormigón fuese un conductor perfecto de calor, las variaciones de temperatura provocarían variaciones de longitud de la viga, la viga se deformaría libremente sin que se produjesen tensiones de adherencia en el interior de la misma. Si, por el contrario, el pretensado y el hormigón tienen coeficientes de dilatación térmica lineal diferentes, o existen inercias térmicas, las variaciones de temperatura producirán tensiones de adherencia entre ambos materiales.

Gracias a la probeta de galgas de compensación (véanse Fotografías 10.2.2-1 y 10.2.2-2) conocemos la variación de deformación térmica que experimenta el pretensado con el recubrimiento de hormigón empleado.



Fotografía 10.2.2-1: Molde de las galgas de compensación, preparado para el hormigonado



Fotografía 10.2.2-2: Probeta de galgas de compensación tras el desmoldeo

En esta investigación no se realiza compensación de deformación, ni en el caso de la armadura pasiva ni en el de la activa, porque desconocemos el coeficiente de dilatación exacto del hormigón ligero y del convencional. No olvidemos que ambas dosificaciones de hormigón ligero, HL10-1 y HL10-2, presentan un contenido de cemento de  $500 \text{ kg/m}^3$ , frente a los  $450 \text{ kg/m}^3$  del HC. Por otra parte, la capacidad de conducción de calor, y por lo tanto la capacidad para disipar el calor de hidratación, es menor en el HL que en el HC (WEIG74).

La compatibilidad térmica es un factor que influye en las propiedades adherentes entre ambos materiales: la falta de compatibilidad térmica produciría tensiones tangenciales entre ambos materiales.

Al no compensar deformaciones térmicas podemos detectar diferencias de comportamiento entre las vigas de los diferentes materiales. En las gráficas de los siguientes apartados, se relaciona para cada viga la fuerza de pretensado aparente con la distancia al extremo Sur de la viga. En este capítulo se define **fuerza de pretensado aparente** la que se deduce de aplicar, a la deformación total medida, la relación {fuerza de pretensado} respecto a la {deformación del alambre} deducida durante el tesado, sin que se efectúe compensación de temperatura ni deducción de las pérdidas de relajación.

En este capítulo se consideran de aplicación las hipótesis del Capítulo 4 (véase Apartado 4.3.4), mediante las cuales se considera la relación {deformación del cordón,  $\epsilon_p$ } respecto a la {deformación del alambre,  $\epsilon_p^*$ } deducida durante el tesado. De esta forma se ajusta una recta de regresión lineal entre ambos valores de deformación. Téngase en cuenta que el valor medido es la deformación del alambre.

A partir de la transferencia la única forma de evaluar la fuerza de pretensado en las vigas es a través de la medida de las deformaciones del pretensado y del hormigón. La **fuerza de pretensado estimada** se ha determinado a partir de las lecturas de deformación de las galgas adheridas al alambre, deduciendo las pérdidas de pretensado previstas por relajación según el algoritmo explicado más adelante en este mismo capítulo, y sin que se hayan compensado las deformaciones térmicas.

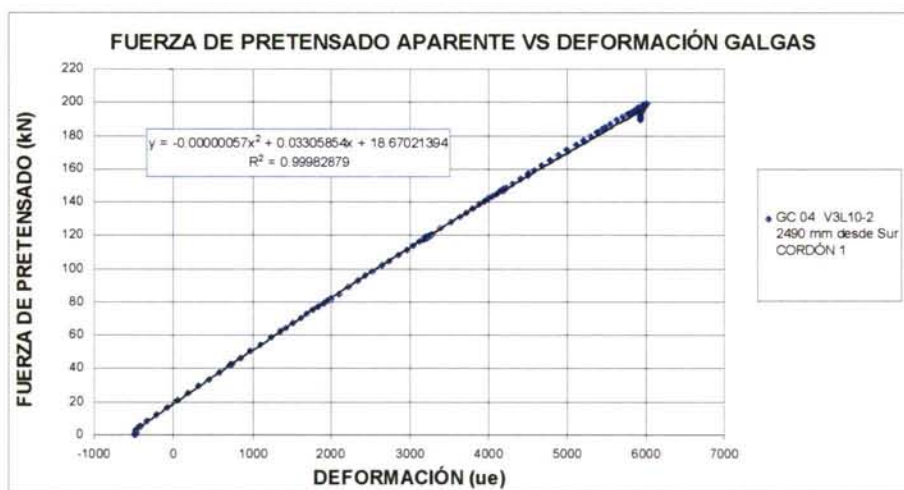


La deformación total del pretensado en cada momento posterior al tesado se puede descomponer en dos sumandos:

1. **Deformación tensional**, es decir, que lleva aparejada una variación de tensión, incluyendo los efectos térmicos.
2. **Deformación de relajación**: variación de deformación a tensión constante.

Para estimar la tensión del pretensado en cada momento nos basamos en la calibración de las galgas efectuada durante el tesado. Efectuando un ajuste por regresión entre la deformación en cada etapa del tesado y la tensión correspondiente se obtiene una curva pretensado-deformación de la banda, cuya precisión depende de la precisión de la medida de la fuerza de pretensado y de la propia deformación de alambre.

Si realizamos un ajuste parabólico, el coeficiente  $R^2$  resultante es excelente, superior en todos los casos analizados a 0.999 (véase Gráfica 10.2.2-2). Este resultado es curioso, debido a que estamos tesando por encima del límite de proporcionalidad, de aproximadamente el 70% del límite elástico (EHE98).



Gráfica 10.2.2-2

Hay que puntualizar que estamos determinando la relación fuerza de pretensado-deformación del alambre. Esta deformación, si bien es similar a la deformación del cordón, no coincide exactamente, como vimos en el Apartado 4.4 (VALD97).

En este caso, la fuerza de pretensado en anclaje se conoce en tan sólo dos de los cuatro cordones de pretensado, y en el anclaje activo. Por ello se ha tenido que estimar la fuerza de pretensado en los cordones sin célula de carga. Dado que el control de la fuerza de pretensado inicial en el anclaje activo hace que la dispersión máxima prevista sea del orden del 5% (EHE98), se decidió estimar la de los cordones restantes tomando la misma que la registrada para el cordón inferior. En la Gráfica 10.2.2-2 se puede ver que el coeficiente que afecta al término cuadrático de la curva de aproximación es prácticamente nulo, por lo que la aproximación lineal es lo suficientemente precisa. En las bandas adheridas a cordones de pretensado no instrumentados con célula de carga, y las que no permanecieron conectadas durante el tesado, aproximaremos la relación fuerza de pretensado-deformación linealmente, según la Tabla 10.2.2-1.

Tabla 10.2.2-1

	Deformación medida	Fuerza de pretensado estimada	
Pretensado provisional	$\varepsilon_p^*(P_1)$	$P_1$	$P(\varepsilon_p^*) = a_0 + a_1 \varepsilon_p^*$
Pretensado definitivo	$\varepsilon_p^*(P_2)$	$P_2$	

donde:

- $P_1$  pretensado provisional de las vigas, para replantear y adherir las galgas extensométricas.
- $P_2$  pretensado definitivo de las vigas, para replantear y adherir las galgas extensométricas.
- $\varepsilon_p^*(P_1)$  deformación del alambre de pretensado correspondiente a la fuerza de pretensado  $P_1$
- $\varepsilon_p^*(P_2)$  deformación del pretensado correspondiente a la fuerza de pretensado  $P_2$
- $P(\varepsilon_p^*)$  fuerza de pretensado estimada a partir de la deformación del pretensado

Durante el tesado se mantuvieron conectadas las galgas de pretensado de las vigas V1L10-1 a V5L10-1. Las cuatro primeras vigas presentan diferentes cuantías de armadura de confinamiento, por lo que trataremos de determinar la posible influencia de esta armadura en las pérdidas de pretensado de los extremos de las vigas y de la zona central. Además, trataremos de analizar la influencia de la cercanía del extremo analizado a la zona de corte, situada entre la sexta y séptima viga, al Norte según el sistema de coordenadas local adoptado.

Las medidas analizadas corresponden a los primeros cinco meses tras la fabricación de las vigas. La fiabilidad de las medidas de las galgas disminuye a medida que pasa el tiempo, debido a que el adhesivo empleado, cianocrilato, tiene una vida estimada inferior a un año. Además, a pesar de la protección exhaustiva de las bandas, durante el hormigonado se pueden producir daños en el recubrimiento. Por ello los datos que proporcionan las bandas deben analizarse con cuidado.

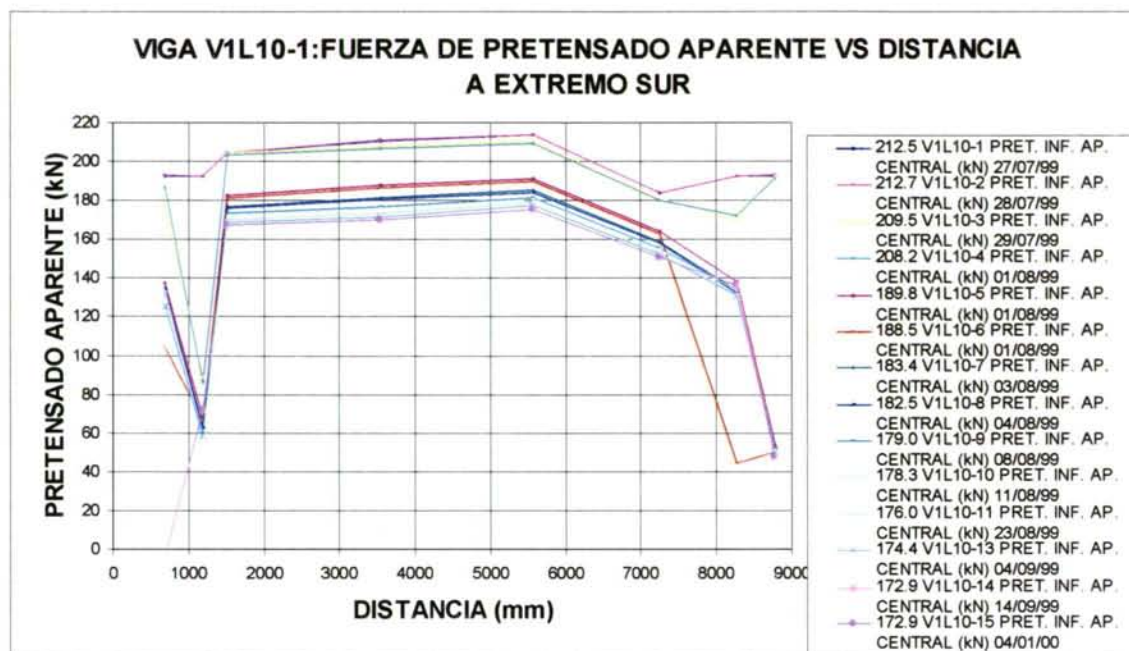
A continuación se exponen los resultados del análisis de las deformaciones de las galgas de pretensado de las cinco vigas más próximas al anclaje activo, vigas que permanecieron conectadas durante el tesado y transferencia de pretensado, por lo que los datos que proporcionan son los más exhaustivos.





### 10.2.3. PÉRDIDAS DE PRETENSADO TRAS LA TRANSFERENCIA

#### 10.2.3.1. Viga V1L10-1: c 6 a 15



Gráfica 10.2.3.1-1

Esta viga es la más alejada de la zona de corte, contigua al anclaje activo. La cuantía de la armadura de confinamiento es la mínima.

A partir de la Gráfica 10.2.3.1-1 y la Tabla 10.2.3.1-1 se deduce que:

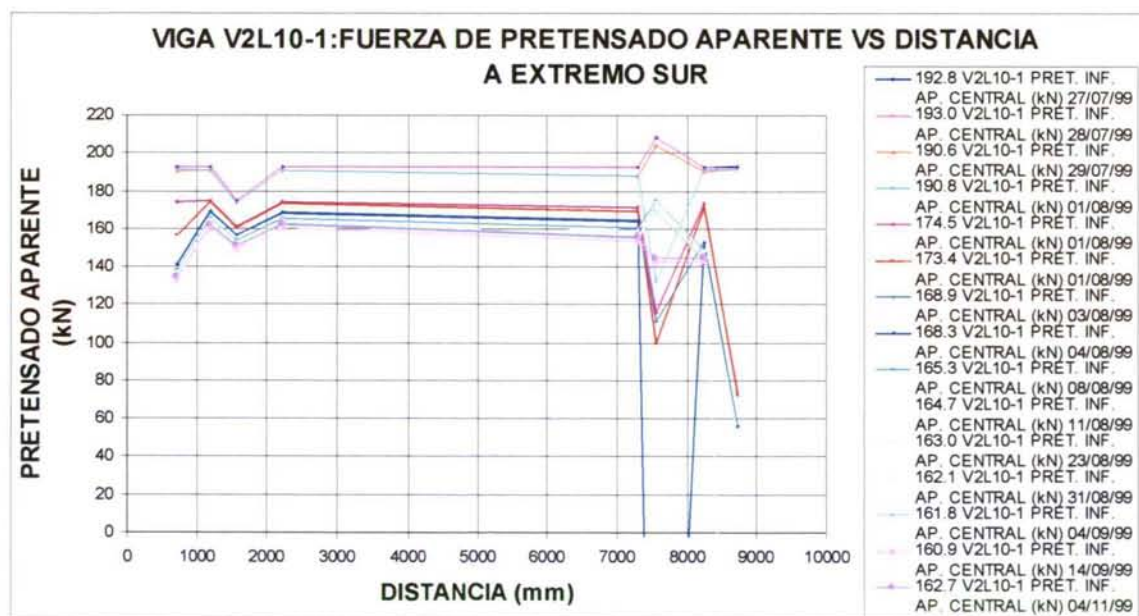
- La fuerza de pretensado inicial aparente deducida de la ley de deformaciones de las galgas es más elevada que la registrada por las células de carga. Esto es debido a la falta de linealidad del diagrama fuerza de pretensado-deformación, que, a pesar de presentar una buena correlación, en la zona final sobrestima la fuerza de pretensado. De todos modos, más que de forma absoluta esta aproximación sirve para estimar las pérdidas de pretensado porcentuales.
- Como se puede observar, las pérdidas de pretensado inferiores en la zona central son del orden del 20% de la fuerza de tesado inicial estimada en cada galga, a los 5 meses de la transferencia.
- Aparentemente las pérdidas de pretensado son superiores en la zona de la viga más próxima a la zona de corte.
- Las pérdidas y la inestabilidad de medidas parecen mayores en el extremo más cercano a la zona de corte, el Norte.
- La estabilización de pérdidas a partir del mes desde la fabricación es notable.
- En el extremo Sur se aprecia un aumento de las pérdidas con el tiempo, superiores a las de la zona central, lo que es debido probablemente a la fisuración progresiva por hendidamiento desde el extremo.
- Se aprecia fallo de las galgas 1ª, 3ª y 9ª desde el extremo Sur, por lo que no se reflejan en la Tabla 10.2.3.1-1.



Tabla 10.2.3.1-1

V1L10-1	c 6 a 15 cm		Galga pretensado inferior 03	Galga pretensado inferior 05	Galga pretensado inferior 06	Galga pretensado inferior 07	Galga pretensado inferior 03	Galga pretensado inferior 05	Galga pretensado inferior 06	Galga pretensado inferior 07
Distancia desde el extremo Sur	(mm)		1515	3555	5565	7245	1515	3555	5565	7245
Cordón			2	2	2	1	2	2	2	1
Operación	Fecha	Tiempo transcurrido desde la transferencia (días)	Fuerza de pretensado kN	Fuerza de pretensado kN	Fuerza de pretensado kN	Fuerza de pretensado kN	%pérdidas de pretensado	%pérdidas de pretensado	%pérdidas de pretensado	%pérdidas de pretensado
Fuerza de pretensado inicial	28/07/99		206.5	211.8	215.7	185.2	0.0	0.0	0.0	0.0
Tesado definitivo, tras penetración de cuñas	28/07/99		204.7	210.8	214.2	183.9	0.9	0.5	0.7	0.7
	28/07/99		202.2	208.6	211.7	181.7	2.1	1.5	1.9	1.9
Después transferencia	01/08/99	0	181.9	187.2	190.3	163.3	11.9	11.6	11.8	11.8
	03/08/99	2	176.8	174.0	185.3	159.0	14.4	17.8	14.1	14.1
	04/08/99	3	175.8	180.9	184.0	157.8	14.9	14.6	14.7	14.8
Estimación tras una semana	08/08/99	7	173.1	175.8	181.0	155.3	16.2	17.0	16.1	16.1
	11/08/99	10	172.4	176.0	180.4	154.8	16.5	16.9	16.4	16.4
Estimación tras un mes	23/08/99	22	170.2	173.3	178.3	152.9	17.6	18.2	17.4	17.4
	31/08/99	30	169.3	172.1	177.4	152.2	18.0	18.7	17.8	17.8
	04/09/99	34	168.8	171.6	177.5	152.2	18.3	19.0	17.7	17.8
	14/09/99	44	167.3	170.2	175.6	150.7	19.0	19.6	18.6	18.6
Estimación tras cinco meses	04/01/00	156	166.8	169.8	175.1	150.2	19.2	19.8	18.8	18.9

## 10.2.3.2. Viga V2L10-1: c 8 a 20



Gráfica 10.2.3.2-1

Tabla 10.2.3.2-1

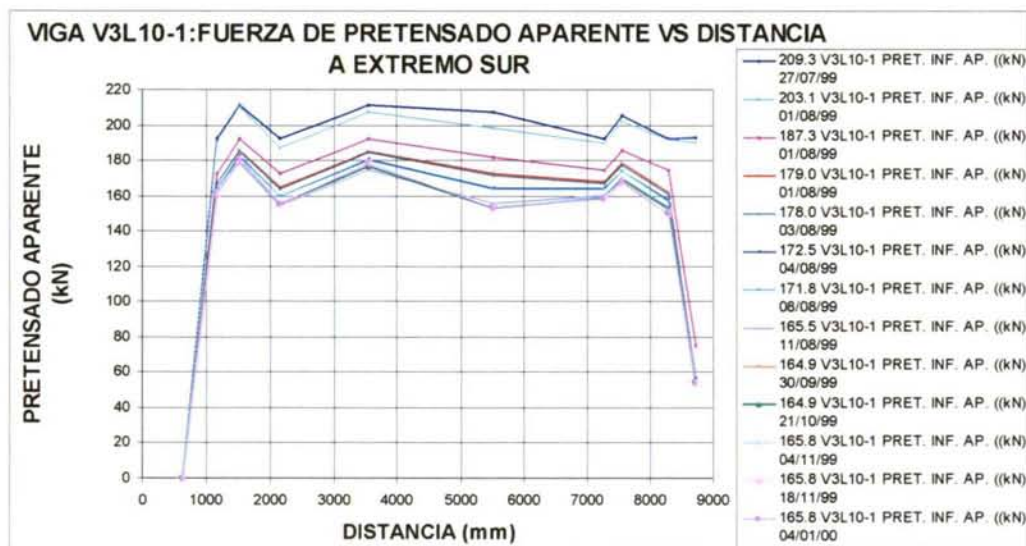
V2L10-1	c 8 a 20	Tiempo transcurrido desde la transferencia (días)	Galga pretensado inferior 01	Galga pretensado inferior 02	Galga pretensado inferior 03	Galga pretensado inferior 04	Galga pretensado inferior 01	Galga pretensado inferior 02	Galga pretensado inferior 03	Galga pretensado inferior 04
Distancia desde el extremo Sur	(mm)		700	1190	1560	2220	700	1190	1560	2220
Cordón			1	3	2	1	1	3	2	1
Operación	Fecha inicio		Estimación fuerza de pretensado (kN)	Estimación fuerza de pretensado (kN)	Estimación fuerza de pretensado (kN)	Estimación fuerza de pretensado (kN)	% pérdidas de pretensado	% pérdidas de pretensado	% pérdidas de pretensado	% pérdidas de pretensado
Fuerza de pretensado inicial	27/07/99		193	194	176	193	0.0	0.0	0.0	0.0
Tesado definitivo, tras penetración de cuñas	27/07/99		189	189	172	189	2.0	2.2	2.4	2.0
Antes transferencia	28/07/99		193	193	175	193	0.3	0.4	0.7	0.3
Después transferencia	01/08/99	0	165	174	161	174	14.9	9.9	8.7	10.1
	03/08/99	2	142	170	—	169	26.8	12.5	—	12.6
	04/08/99	3	141	169	160	168	27.2	12.9	8.7	13.0
Estimación tras una semana	08/08/99	7	138	166	154	166	28.7	14.5	12.5	14.4
	11/08/99	10	137	165	153	165	29.2	15.0	13.0	14.8
	23/08/99	21	135	162	151	163	30.3	16.2	14.0	15.8
Estimación tras un mes	31/08/99	30	134	161	150	162	30.7	16.7	14.4	16.2
	04/09/99	33	134	161	150	162	30.9	16.9	14.6	16.4
	14/09/99	43	133	160	149	161	31.4	17.4	15.1	16.9
	01/10/99	60	134	162	151	162	30.5	16.6	14.3	16.0
	21/10/99	81	134	162	151	163	30.5	16.6	14.2	15.9
	04/11/99	95	134	162	151	163	30.5	16.6	14.2	15.9
	17/11/99	108	121	161	151	162	37.5	16.6	14.3	16.0
Estimación tras cinco meses	05/01/00	157	106	162	150	162	45.1	16.6	14.6	16.1



A partir de la Gráfica 10.2.3.2-1 y la Tabla 10.2.3.2-1 se deduce que:

- Se aprecian mayores pérdidas de pretensado en extremo Norte, aparente indicio de fisuración superior en ese extremo.
- Se ha producido el fallo de las galgas de la zona central (galgas 5ª, 6ª y 8ª), por lo que no se incluyen en la Tabla 10.2.3.2-1, ni en la Gráfica 10.2.3.2-1.
- La pérdida de pretensado estimada es muy elevada en extremo Norte.
- Las pérdidas de pretensado son menores que en la viga anterior, lo que podría estar motivado por la mayor cuantía de armadura de confinamiento.
- El aumento de la fuerza de pretensado aparente del 27/7/99 al 28/7/99 (Tabla 10.2.3.2-1) puede ser debido a los efectos térmicos o a un fallo de la medida.

### 10.2.3.3. Viga V3L10-1: c 8 a 15



Gráfica 10.2.3.3-1

A partir de la Gráfica 10.2.3.3-1 y la Tabla 10.2.3.3-1 se deduce que:

- Esta viga es la de mayor cuantía de armadura de confinamiento.
- Tanto las pérdidas de pretensado como la inestabilidad son menores que en las vigas estudiadas anteriormente, a pesar de la mayor cercanía de esta viga a la zona de corte.
- La longitud de transmisión del extremo Norte (próximo al corte) se encuentra aparentemente entre la segunda y la tercera banda, probablemente más cerca de la tercera, situada a aproximadamente metro y medio del extremo. Sin embargo, la longitud de transmisión aparente del extremo Sur es menor, de aproximadamente un metro.
- Se puede apreciar en la gráfica que las pérdidas de pretensado son superiores en la parte Norte, del lado de la zona de corte. La fisuración se puede intuir en el extremo Norte, el más cercano a la zona de corte, a la vista del comportamiento de las dos bandas más septentrionales.
- A la vista de la magnitud de las pérdidas de pretensado en la zona central, de entre el 16 y el 17%, se puede aventurar que la armadura de confinamiento es efectiva. Aunque no logra evitar que se produzca fisuración por hendimiento, es capaz de limitar las pérdidas.

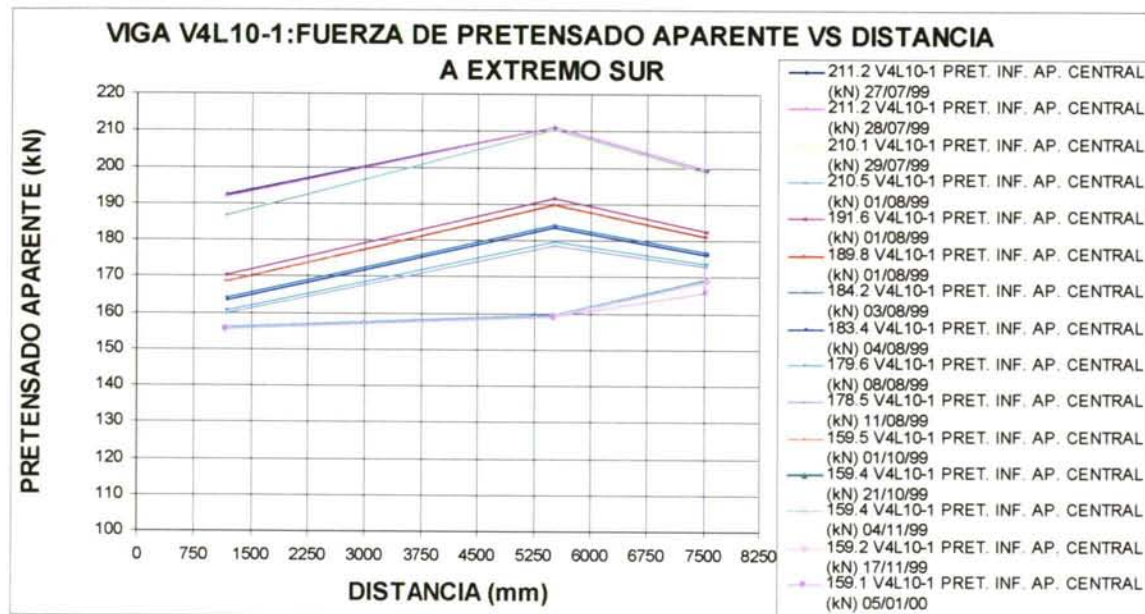




### 10.2.3.4. Viga V4L10-1: c 6 a 10

A partir de la Gráfica 10.2.3.4-1 y la Tabla 10.2.3.4-1 se deduce que:

- Se producen fallos en la mayor parte de las bandas extensométricas (sólo se adjuntan datos de 3 galgas).
- Se observa un fallo temporal en la conexión de la galga de pretensado inferior 06, fallo que aparentemente se subsanó en las medidas posteriores a la transferencia (Tabla 10.2.3.4-1).



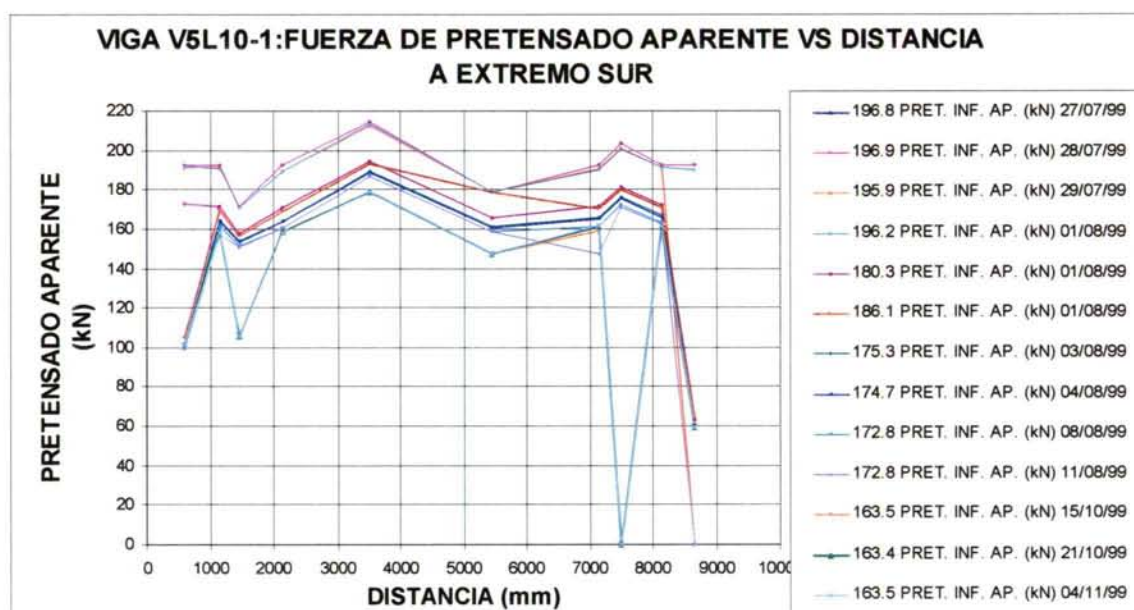
Gráfica 10.2.3.4-1

Tabla 10.2.3.4-1

V4L10-1	c 6 a 10		Galga pretensado inferior 02	Galga pretensado inferior 06	galga pretensado inferior 08	Galga pretensado inferior 02	Galga pretensado inferior 06	Galga pretensado inferior 08
Distancia desde el extremo Sur (mm)			1170	5510	7540	1170	5510	7540
Cordón			1	2	2	1	2	2
Operación	Fecha	Tiempo transcurrido desde la transferencia (días)	Pretensado (kN)	Pretensado (kN)	Pretensado (kN)	% pérdidas de pretensado	% pérdidas de pretensado	% pérdidas de pretensado
Fuerza de pretensado inicial	27/07/99		199.4	199.4	199.4	0.0	0.0	0.0
Tesado definitivo, tras penetración de cuñas	27/07/99		189.0	207.8	195.9	5.2	-4.2	1.7
Antes transferencia	28/07/99		192.0	211.1	199.3	3.7	-5.9	0.0
Después transferencia	01/08/99	0	169.5	190.6	181.6	15.0	4.4	8.9
	03/08/99	2	164.3	184.4	177.1	17.6	7.5	11.2
	04/08/99	3	163.5	183.4	176.1	18.0	8.0	11.7
Estimación tras una semana	08/08/99	7	160.7	179.9	173.5	19.4	9.8	13.0
	11/08/99	10	159.7	178.5	172.8	19.9	10.5	13.4
	23/08/99	22	157.7	172.0	170.4	20.9	13.7	14.5
Estimación tras un mes	31/08/99	30	157.1	165.5	169.9	21.2	17.0	14.8
	04/09/99	34	156.8	161.3	170.2	21.4	19.1	14.6
	14/09/99	44	156.1	157.5	168.2	21.7	21.0	15.7
	01/10/99	61	155.7	159.3	169.4	21.9	20.1	15.1
	21/10/99	81	155.7	159.3	169.4	21.9	20.1	15.1
Estimación tras tres meses	04/11/99	95	155.7	159.4	169.5	21.9	20.1	15.0
	17/11/99	108	155.6	159.1	168.7	22.0	20.2	15.4
Estimación tras cinco meses	05/01/00	157	155.4	159.0	165.6	22.1	20.3	17.0

- Las pérdidas del pretensado inferior son elevadas, del orden del 20% en la zona central.
- Se aprecian pérdidas de pretensado más elevadas en extremo Norte, del lado del corte.
- La fuerza de pretensado se mantiene aproximadamente constante en el intervalo de la gráfica, ente los 1000 y los 7500 mm desde el extremo Sur. De esto se deduce que de una forma aproximada la longitud de transmisión Sur no supera los 1000 mm y la Norte (lado del corte) los 2500 mm.

#### 10.2.3.5. Viga V5L10-1: c 6 a 15



Gráfica 10.2.4.5-1

Esta viga posee la misma cuantía de armadura de confinamiento que la viga V1L10-1, es decir, la cuantía mínima. La diferencia estriba en la cercanía a la zona de corte, superior en esta viga.

A partir de la Gráfica 10.2.3.5-1 y la Tabla 10.2.3.5-1 se deduce que:

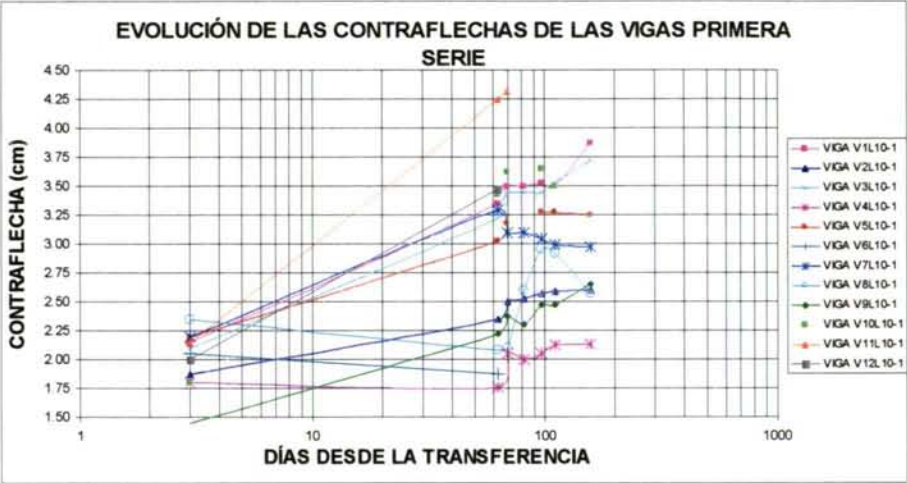
- Las pérdidas de pretensado inferior son de aproximadamente el 20% de la fuerza de pretensado, valor similar al detectado en la viga V1L10-1. No se aprecia la incidencia de la cercanía al corte.
- La longitud de transmisión aparente en ambos extremos es de 1000 mm aproximadamente.
- Fallaron las galgas 3ª, 8ª y 10ª, por lo que no se incluyen en la Tabla 10.2.3.5-1.
- Se observan medidas anómalas en la galga de pretensado inferior 05, antes y tras la transferencia, lo que cuestiona la fiabilidad de las estimaciones realizadas a partir de las medidas de esa banda.



Tabla 10.2.3.5-1

VSL10-1	c 6 a 15		Galga pretensado inferior 02	Galga pretensado inferior 04	Galga pretensado inferior 05	Galga pretensado inferior 06	Galga pretensado inferior 07	Galga pretensado inferior 09	Galga pretensado inferior 02	Galga pretensado inferior 04	Galga pretensado inferior 05	Galga pretensado inferior 06	Galga pretensado inferior 07
Distancia desde el extremo Sur (mm)			1160	2150	3530	5460	7150	8150	1160	2150	3530	5460	7150
Cordón			3	3	2	2	1	1	3	3	2	2	1
Operación	Fecha	Tiempo trans. desde la transferencia (días)	Pretensado (kN)	Pretensado (kN)	Pretensado (kN)	Pretensado (kN)	Pretensado (kN)	Pretensado (kN)	% pérdidas de pretensado	% pérdidas de pretensado	% pérdidas de pretensado	% pérdidas de pretensado	% pérdidas de pretensado
Fuerza de pretensado inicial	28/07/99		199.4	199.4	199.4	199.4	199.4	199.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tesado definitivo, tras penetración de cuñas	28/07/99		192.7	192.6	—	179.2	192.6	192.6	3.4	3.4	—	10.1	3.4
	28/07/99		189.3	189.3	—	176.0	189.2	189.2	5.1	5.1	—	11.7	5.1
	03/08/99	2	170.3	169.8	193.8	175.8	170.6	171.6	14.6	14.8	2.8	11.8	14.4
	04/08/99	3	164.8	164.4	189.2	165.7	165.9	167.2	17.3	17.5	5.1	16.9	16.8
Estimación tras una semana	08/08/99	7	164.0	163.6	188.4	175.7	170.5	166.1	17.7	17.9	5.5	11.9	14.5
	11/08/99	10	161.0	160.3	186.9	158.8	160.8	167.1	19.2	19.6	6.3	20.3	19.4
	23/08/99	22	160.0	160.0	186.5	158.1	159.8	162.3	19.8	19.8	6.5	20.7	19.8
Estimación tras un mes	31/08/99	30	156.8	157.7	184.1	156.1	157.3	159.8	21.4	20.9	7.7	21.7	21.1
	04/09/99	34	156.0	156.1	183.1	155.6	156.6	158.6	21.7	21.7	8.2	22.0	21.5
	14/09/99	44	155.8	156.4	178.7	155.2	156.6	158.9	21.9	21.6	10.4	22.1	21.4
	30/09/99	60	153.7	154.2	174.7	144.4	154.8	157.1	22.9	22.7	12.4	27.6	22.3
	21/10/99	81	157.5	158.1	178.9	147.7	160.7	160.8	21.0	20.7	10.3	25.9	19.4
Estimación tras tres meses	04/11/99	95	157.6	158.2	179.0	147.7	154.6	160.9	21.0	20.6	10.2	25.9	22.4
	18/11/99	109	157.7	158.2	179.0	147.8	161.1	160.9	20.9	20.6	10.2	25.9	19.2
Estimación tras cinco meses	04/01/00	156	157.8	158.3	180.7	147.1	162.3	161.2	20.8	20.6	9.4	26.2	18.6

10.2.4. CONTRAFLECHAS TRAS LA TRANSFERENCIA Y DETECCIÓN DE LA FISURACIÓN



Gráfica 10.2.4-1

- Como se puede observar en la Gráfica 10.2.4-1, las contraflechas medidas tras la transferencia de pretensado toman valores entre 1.5 y 2.3 cm.
- A los cinco meses los valores son mayores, están comprendidos entre 2 y 4 cm.
- La dispersión en la medida es apreciable desde la transferencia, y aumenta con la edad. Esta dispersión puede estar debida a la microfisuración inducida por la transferencia, a las variaciones entre la composición de las amasadas, y a las condiciones de curado diferentes (FHWA94).

10.2.5. CONCLUSIONES

Parece que se aprecia una diferencia cuantitativa entre las pérdidas de pretensado de las vigas, según la cuantía de confinamiento. La viga con máxima cuantía, viga V3L10-1, presenta una mayor estabilidad de la fuerza de pretensado, a lo largo de toda la viga.

Todas las vigas fisuraron, comenzando a apreciarse las fisuras visualmente la semana siguiente a la transferencia de pretensado. En la Tabla 10.2.5-1 aparecen los días transcurridos desde la transferencia, hasta la detección de las fisuras visibles.

Tabla 10.2.5-1

Días transcurridos desde la transferencia hasta la detección de fisuras visibles	Armadura de confinamiento	Sur	Norte
VIGA			
V1L10-1	c 6 a 15	9	25
V2L10-1	c 8 a 20	9	60
V3L10-1	c 8 a 15	9	25
V4L10-1	c 6 a 10	9	25
V5L10-1	c 6 a 15	9	9
V6L10-1	c 6 a 10	25	25
V7L10-1	c 8 a 15	6	25
V8L10-1	c 8 a 20	6	9
V9L10-1	c 6 a 10	9	9
V10L10-1	c 6 a 15	6	9
V11L10-1	c 8 a 15	6	25
V12L10-1	c 8 a 20	9	25



Como se puede observar, la totalidad de las vigas presentó fisuras desde el extremo durante el mes posterior a la fabricación. Las primeras fisuras se observaron durante la primera semana después de la transferencia.

La aparición de fisuras en las vigas con cuantía de armadura de confinamiento máxima se detectó a los 25 días. Esto indica una posible influencia de la mayor cuantía, la cual, si bien no impide la fisuración, al menos retrasa su aparición.

En todas las vigas las fisuras se propagaron desde los extremos hacia el centro, generalizándose a lo largo de toda la longitud de la viga en los primeros dos meses. Se observó que cuando la fisura alcanzaba la zona de apoyo de la viga, se ralentizaba la velocidad de fisuración: transcurrían varios días o incluso semanas hasta que la fisura superaba la zona de apoyo, y avanzaba hacia el interior de la viga.

Por esto se tomó la decisión de:

- Modificar la dosificación de los hormigones ligeros. Se obtuvo una nueva dosificación, HL10-2, tal como se explicó en capítulos anteriores.
- Fabricar nuevas vigas de este nuevo material, HL10-2 y del hormigón convencional de referencia HC.

Durante la primera serie se comprobó que la instrumentación y fabricación de doce vigas, respetando la edad de transferencia de fábrica era inviable con los medios disponibles. Por esto se decidió disminuir el número de vigas en la siguiente serie.

### **10.3. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA: VIGAS DE LA SEGUNDA SERIE**

#### **10.3.1. DESCRIPCIÓN DE LAS VIGAS FABRICADAS**

A la vista de la fisuración longitudinal de todas las vigas de HL10-1 fabricadas, se decidió cambiar la dosificación de hormigón ligero. Una vez obtenida una dosificación satisfactoria, que con la mínima densidad garantizaba el cumplimiento de los requisitos descritos en el Capítulo 9, se decidió fabricar:

- Vigas de hormigón convencional, HC, a fin de completar el estudio comparativo. La transferencia de las vigas de HL10-1 había resultado mucho más violenta que la transferencia de las vigas reales. Por esto no se descartaba la posible fisuración de las vigas de HC tras la misma.
- Vigas del nuevo hormigón ligero, HL10-2, en un intento de resolver la cuestión de la viabilidad de la fabricación de las vigas pretensadas de hormigón ligero.

Así como la variable de la primera serie era la cuantía de armadura de confinamiento, la variable de la segunda serie se reduce al tipo de material.

Las vigas de la segunda serie difieren de las de la primera en el tipo de material (HL10-2 y HC, en vez de HL10-1). La cuantía de armadura de confinamiento es la misma en

todas las vigas de la segunda serie, en forma de cercos de 8 mm a 15 cm. Manteniendo fija la cantidad de vigas por variable de la primera serie, se decidió fabricar tres vigas de HC y tres vigas de HL10-2, en total seis vigas, con la armadura de confinamiento máxima de la primera serie.

En esta segunda serie, se realizaron las siguientes modificaciones respecto a la serie anterior (véase la Figura 10.3.1-1):

- La armadura de confinamiento adoptada es la máxima de la serie anterior, para todas las vigas.
- La fabricación de tan sólo seis vigas en la bancada planteaba el problema de que la longitud de cable libre era excesiva, lo que conduciría a una transferencia más súbita que en el caso anterior. Por ello se dispusieron bloques de hormigón de amortiguación a ambos lados de la zona de corte, y después de las vigas extremas hacia los anclajes.
- Se decidió instrumentar el máximo número de cordones de pretensado mediante las células de carga. Se instrumentaron tres cordones de pretensado del anclaje activo (el máximo número posible, dada la separación entre cordones de pretensado), y también el cordón superior del anclaje pasivo, para evaluar las pérdidas de rozamiento a lo largo de la bancada.
- Se instrumentó la armadura de confinamiento y transversal a cortante en las vigas.
- Se instrumentó una cara lateral de las vigas, intensificando medidas en las vigas V2L10-2 y V5C, vigas destinadas al estudio de las propiedades reológicas. En estas vigas se instrumentó la armadura de confinamiento de ambos extremos, y no la de cortante. Además se colocaron discos de extensometría a la altura del cordón superior de pretensado, a fin de determinar la longitud de transmisión del cordón superior.
- Se dispusieron galgas de pretensado en una zona de cable desnudo, entre las vigas 3 y el bloque 2 de amortiguación para poder estimar la tensión de la zona de cable desnudo antes y durante la transferencia.

Las seis vigas se fabricaron la segunda semana de febrero del 2000, en la misma bancada de la primera serie.



ANCLAJE PASIVO

ANCLAJE ACTIVO

SUR	BLOQUE 1	V1L10-2	V2L10-2	V3L10-2	BLOQUE 2	ZONA DE CORTE	BLOQUE 3	V4C	V5C	V6C	BLOQUE 4	BLOQUES
GALGAS CABLE DESNUDO												

VIGA	BLOQUE 1	V1L10-2	V2L10-2	V3L10-2	BLOQUE 2	ZONA CORTE	BLOQUE 3	V4C	V5C	V6C	BLOQUE 4
Material	HC	HL10-2	HL10-2	HL10-2	HC		HC	HC	HC	HC	HC
Armadura de confinamiento		c 8 a 15	c 8 a 15	c 8 a 15				c 8 a 15	c 8 a 15	c 8 a 15	
Galgas armadura confinamiento		S	S-N	S				N	N-S	N	
Galgas armadura a cortante		N		N				S		S	
Galgas pretensado superior		X	X	X				X	X	X	
Viga ensayada		X		X				X		X	
Instrumentación medidas deformación hormigón		X	X	X				X	X	X	

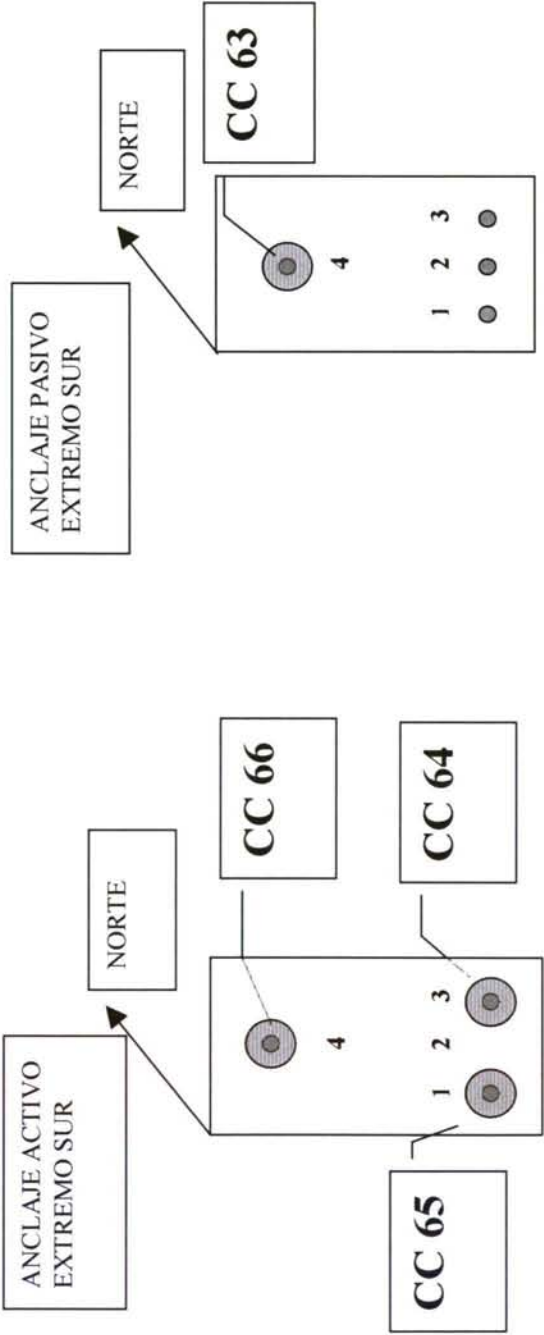


Figura 10.3.1-1

### 10.3.2. PÉRDIDAS DE PRETENSADO ANTES DE LA TRANSFERENCIA

En la Tabla 10.3.2-1 se presentan los valores de la fuerza de pretensado proporcionados por las células de carga de ambos anclajes, hasta el momento de la transferencia. A partir de entonces sólo se dispone de las medidas de las bandas extensométricas y los discos de extensometría.

Para controlar las deformaciones térmicas del pretensado y del hormigón se fabricó una probeta de galgas de compensación térmicas, de hormigón ligero HL10-2. En la Gráfica 10.3.2-1 se reflejan las variaciones de la fuerza de pretensado estimadas, haciendo la hipótesis de que la deformación de pretensado está totalmente coartada.

En esta serie se dispuso de información de las pérdidas de rozamiento del cordón de pretensado superior, durante el tesado y hasta la transferencia, pérdidas que ascienden a varios kN. Durante el tesado los separadores entre vigas se mantuvieron sueltos, lo que parece que garantizaría pérdidas mínimas de rozamiento, y sin embargo suponen un valor apreciable.

En la Gráfica 10.3.2-3 aparecen las pérdidas de rozamiento respecto a la fuerza de pretensado en el anclaje activo, y la relación entre la fuerza de pretensado en el anclaje activo respecto a la fuerza de pretensado en anclaje pasivo, para el cordón 4.

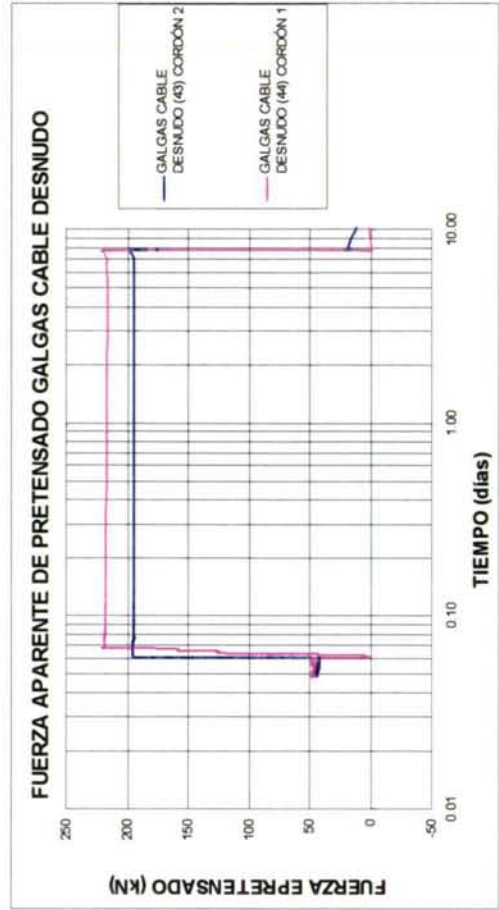
Por otra parte, se ha empleado la relación deducida fuerza de pretensado-deformación del alambre durante el tesado para las bandas extensométricas de cable desnudo adheridas al cordón 2 y al cordón 1. De esta forma disponemos de una estimación de la fuerza de pretensado tras el tesado para el único cordón sin célula de carga, antes y durante la transferencia (véase la Gráfica 10.3.2-4).

En la Gráfica 10.3.2-2 se puede apreciar claramente el tesado y la transferencia: esta es inicialmente gradual en ambas galgas hasta el instante en que, por rotura del pretensado de la zona de corte se desencadena la transferencia súbita.

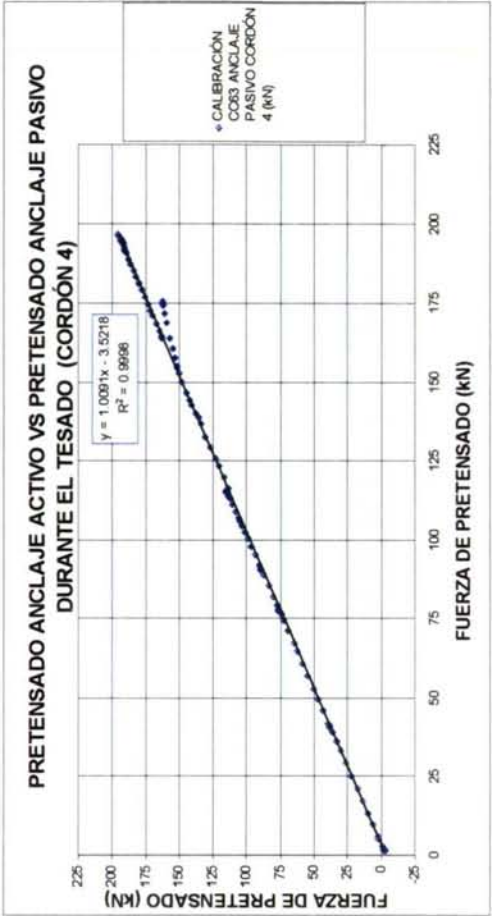


Tabla 10.3.2-1

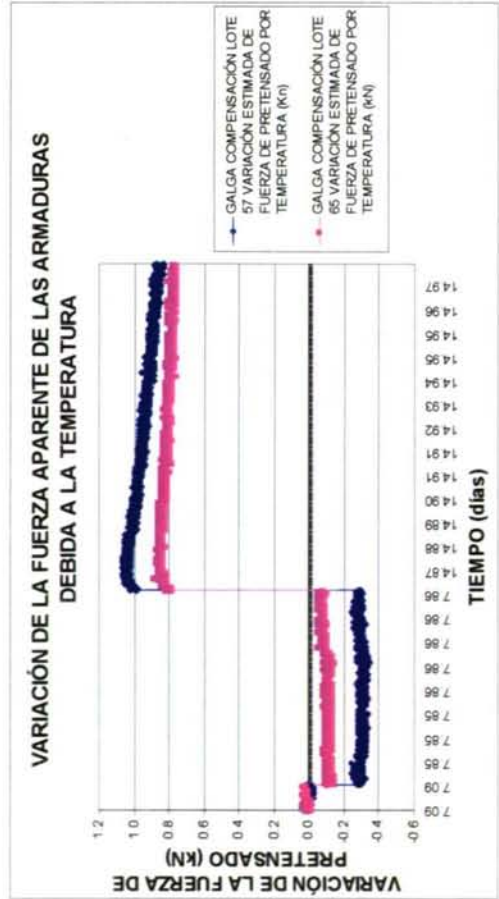
							Fuerza de pretensado célula de carga	Fuerza de pretensado célula de carga	Fuerza de pretensado célula de carga	Pérdidas por rozamiento	Estimación fuerza de pretensado	Fuerza de pretensado célula de carga	Fuerza de pretensado célula de carga	Fuerza de pretensado célula de carga	Fuerza de pretensado célula de carga	Estimación fuerza de pretensado galgas cable desnudo	Estimación fuerza de pretensado galgas cable desnudo
							A. Activo	A. Activo	A. Activo	A. Pasivo		A. Activo	A. Activo	A. Activo	A. Pasivo	Entre V3 y bloque	Entre V3 y bloque
Cordón							1	3	4	4	2	1	3	4	4	2	2
						Tiempo transcurrido desde el tesado definitivo (días)											
Tesado provisional	03/02/00	17:16:43	03/02/00	17:24:05	17:24:05		18.3	20.6	18.0								
Fuerza de pretensado inicial	03/02/00	18:17:32	03/02/00	19:39:48	19:39:48	0.06	199.4	202.9	196.5	195.4	196.3	199.4	202.9	196.5	195.4	196.3	196.3
Tesado definitivo, tras penetración de cuñas	03/02/00	18:17:30	03/02/00	19:39:48	19:39:48	0.06	193.7	197.2	193.2	191.3	194.1	193.7	197.2	193.2	191.3	194.1	195.5
Día hornigonado	08/02/00	18:41:34	08/02/00	18:49:59	18:49:59	5.02	191.6		189.7	187.9		191.4	197.2	191.0	189.1	194.1	
Día antes de la transferencia	10/02/00	18:50:07	10/02/00	19:06:12	19:06:12	7.03	189.8	192.8	188.4	186.0	187.5	191.3	197.0	190.8	188.9	193.9	195.0
Antes transferencia	11/02/00	12:58:52	11/02/00	13:27:20	13:27:20	7.80	189.3	192.5	188.4	186.1	194.7	191.2	197.0	190.8	188.9	193.9	198.4
Momento anterior a la transferencia	11/02/00	13:27:21	11/02/00	13:27:30	13:27:30	7.80	188.9	192.0	187.6	186.2	182.0	191.2	197.0	190.8	188.9	193.9	185.9
Después transferencia	11/02/00	13:27:31	11/02/00	13:37:12	13:37:12		-0.4	0.3	-0.1	-3.7	-3.6						



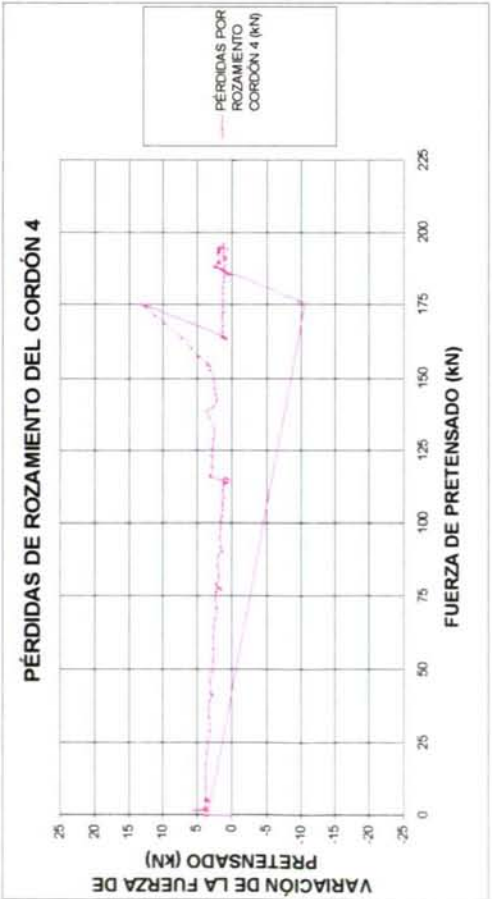
Gráfica 10.3.2-2



Gráfica 10.3.2-4



Gráfica 10.3.2-1

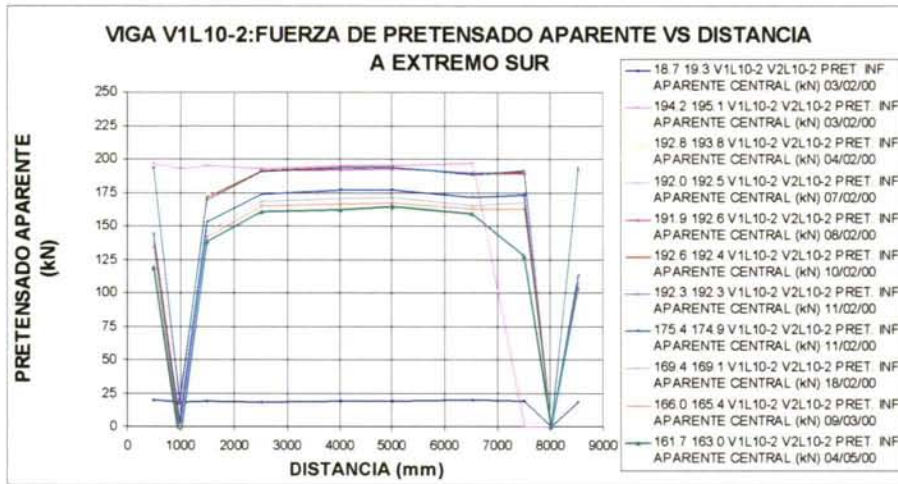


Gráfica 10.3.2-3



### 10.3.3. PÉRDIDAS DE PRETENSADO TRAS LA TRANSFERENCIA

#### 10.3.3.1. Viga V1L10-2: c 8 a 15



A partir de las Gráficas 10.3.3.1-1 a 10.3.3.1-3 y la Tabla 10.3.3.1-1 se deduce que:

- Se aprecia la evolución de la longitud de transmisión aparente de 1500 mm el 9/3/00 a 2500 mm el 4/5/00, en el extremo Norte. Esto puede ser debido a la evolución de la fisuración longitudinal por hendimiento, que provocaría en el caso más desfavorable una pérdida de pretensado generalizada a lo largo de toda la viga.
- En la zona central las pérdidas de pretensado son de aproximadamente el 17% para el pretensado inferior, y del 7% para el pretensado superior.
- En la última medida la longitud de transmisión aparente en ambos extremos es de 2500 mm.
- Las tensiones estimadas de trabajo de la armadura de confinamiento son elevadas, de 150 MPa o más, lo que implica que para que se produzca esto ha debido fisurar el hormigón a tracción (véase Gráfica 10.3.3.1-3).
- Aunque la armadura de cortante se dispuso en forma de estribos para evitar el confinamiento del hormigón, se generan tensiones elevadas en la misma, del orden de 2/3 de las de la armadura de confinamiento (véase Gráfica 10.3.3.1-2).
- Se aprecia el fallo de las galgas de cable 2ª, 9ª y 10ª en la Gráfica 10.3.3.1-1.

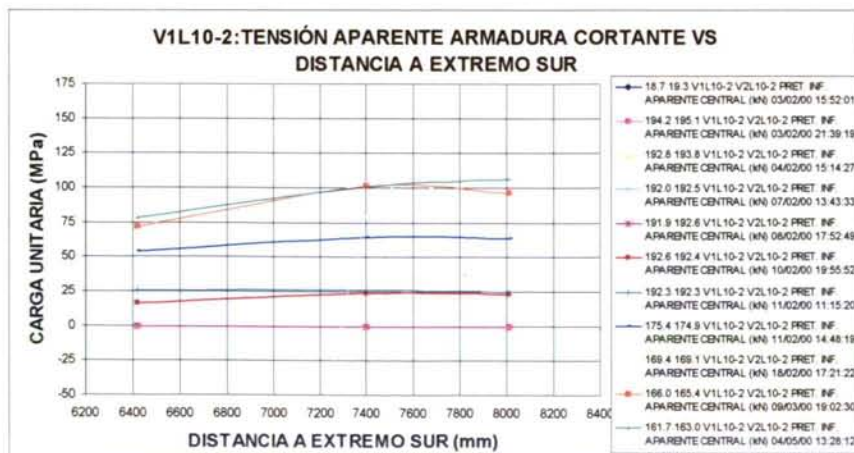


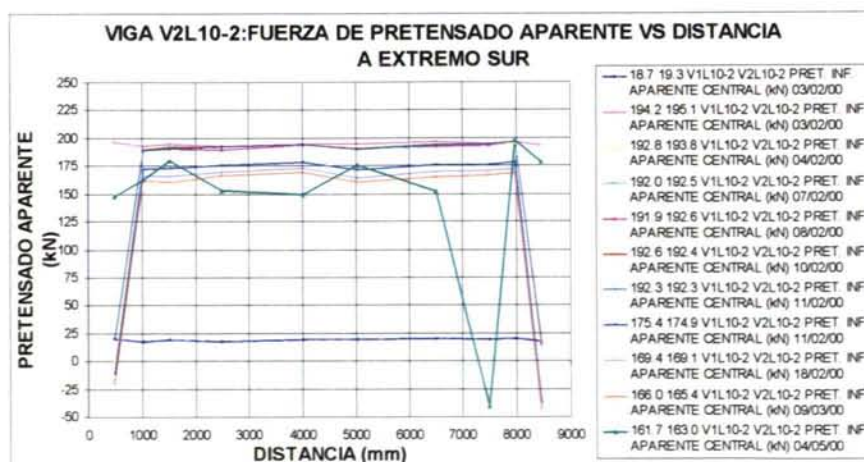
Tabla 10.3.3.1-1

V1L10-2	c 8 a 15		Galga pretensado inferior 05	Galga pretensado inferior 06	Galga pretensado superior 11	Galga pretensado inferior 05	Galga pretensado inferior 06	Galga pretensado superior 11
Distancia desde extremo Sur (mm)			4020	5020	4020	4020	5020	4020
Cordón			Cordón 2	Cordón 2	Cordón 4	Cordón 2	Cordón 2	Cordón 4
		Tiempo transcurrido desde la transferencia (días)	Fuerza de pretensado estimada (kN)	Fuerza de pretensado estimada (kN)	Fuerza de pretensado estimada (kN)	% pérdidas de pretensado	% pérdidas de pretensado	% pérdidas de pretensado
Tesado provisional	03/02/00		19	19	18			
Fuerza de pretensado inicial	03/02/00		195	195	193	0.0	0.0	0.0
Tesado definitivo, tras penetración de cuñas	04/02/00		190	195	189	2.4	0.1	1.9
	07/02/00		193	193	191	1.3	0.9	0.8
Día hormigonado	08/02/00		192		192	1.4		0.5
Día antes de la transferencia	10/02/00		193	194	191	0.9	0.7	1.1
Antes transferencia	11/02/00	0	194	194	190	0.8	0.6	1.3
Estimación tras una semana	18/02/00	7	170	171	190	12.8	12.3	1.3
Estimación tras un mes	09/03/00	27	166	168	182	14.7	14.1	5.7
Estimación tras tres meses	04/05/00	83	162	164	179	16.9	15.7	6.9



Gráfica 10.3.3.1-3

## 10.3.3.2. Viga V2L10-2: c 8 a 15

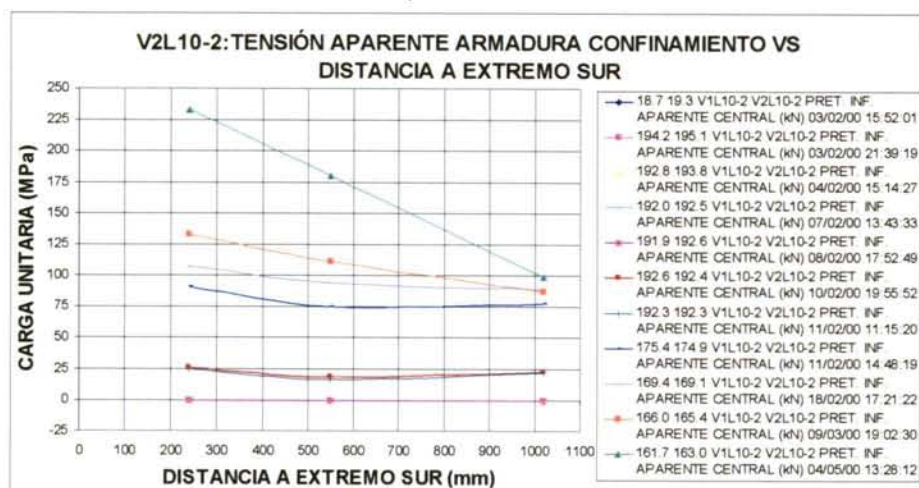


Gráfica 10.3.3.2-1





Gráfica 10.3.3.2-2



Gráfica 10.3.3.2-3

A partir de las Gráficas 10.3.3.2-1 a 10.3.3.2-3 y la Tabla 10.3.3.2-1 se deduce que:

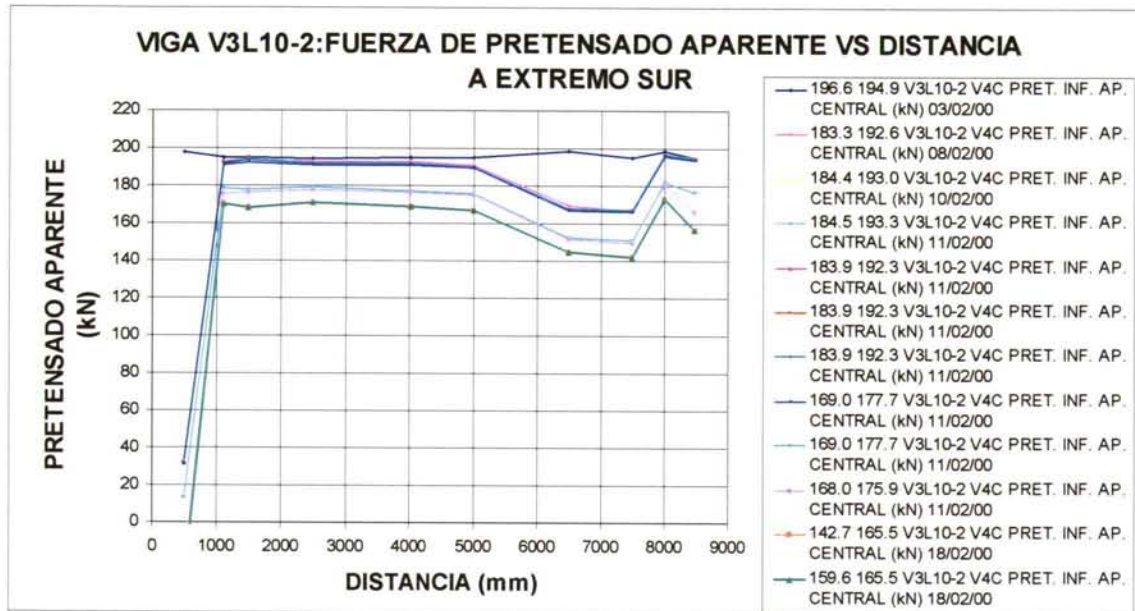
- Las medidas de deformación hasta los 28 días presentan una gran regularidad. Se aprecia una dispersión grande en las medidas de la última fecha de toma de datos, debido a fallo de las galgas 1ª, 3ª, 8ª y 10ª.
- Las pérdidas de pretensado en la zona central son del 16% para el pretensado inferior y del 4% para el pretensado superior.
- La variación de tensión máxima de la armadura de confinamiento de la zona Norte es de 230 MPa aproximadamente, valor muy elevado. Se aprecia una pérdida de tensión en la banda más extrema entre el 9/3/00 y el 4/5/00, probablemente debida a la fisuración progresiva por hendimiento (véase Gráfica 10.3.3.2-3).
- La armadura a cortante de la zona Sur sufre una variación de tensión máxima de 135 MPa aproximadamente (75% de la tensión de la armadura de confinamiento). Se aprecia una pérdida de tensión en la banda más extrema entre el 9/3/00 y el 4/5/00, probablemente debida a la fisuración progresiva por hendimiento (véase Gráfica 10.3.3.2-2).
- Las tensiones originadas son superiores en la zona Norte, precisamente la más próxima a la zona de corte.

Tabla 10.3.3.2-I

V2L10-2	c 8 a 15		Galga pretensado inferior 05 (57)	Galga pretensado inferior 06 (58)	Galga pretensado superior 11 (63)	Galga pretensado superior 12 (64)	Galga pretensado inferior 05 (57)	Galga pretensado inferior 06 (58)	Galga pretensado superior 11 (63)	Galga pretensado superior 12 (64)
Distancia desde extremo Sur (mm)			4010	5030	4010	5030	4010	5030	4010	5030
Cordón			2	2	4	4	2	2	4	4
		Tiempo transcurrido desde la transferencia (días)	Fuerza de pretensado estimada (kN)	Fuerza de pretensado estimada (kN)	Fuerza de pretensado estimada (kN)	Fuerza de pretensado estimada (kN)	% pérdidas de pretensado	% pérdidas de pretensado	% pérdidas de pretensado	% pérdidas de pretensado
Tesado provisional	03/02/00		19	19	18	18				
Fuerza de pretensado inicial	03/02/00		195	195	193	193	0.0	0.0	0.0	0.0
Tesado definitivo, tras penetración de cuñas	04/02/00		191	188	189	189	1.9	3.6	2.0	2.0
	07/02/00		193	190	191	188	0.8	2.5	1.0	2.4
	08/02/00		194	191	191	188	0.5	2.1	0.7	2.2
Día del hormigonado										
Día antes de la transferencia	10/02/00		195	190	192	190	0.2	2.7	0.3	1.5
Antes transferencia	11/02/00	0	195	190	192	190	0.3	2.7	0.2	1.5
Después transferencia	11/02/00	0	178	171	187	184	8.7	12.5	3.0	4.6
Estimación tras una semana	18/02/00	7	173	165	186	183	11.3	15.6	3.5	5.1
Estimación tras un mes	09/03/00	27	170	160	184	181	13.1	17.7	4.4	6.0
Estimación tras tres meses	04/05/00	83	150	176	-23	149	23.3	9.9		



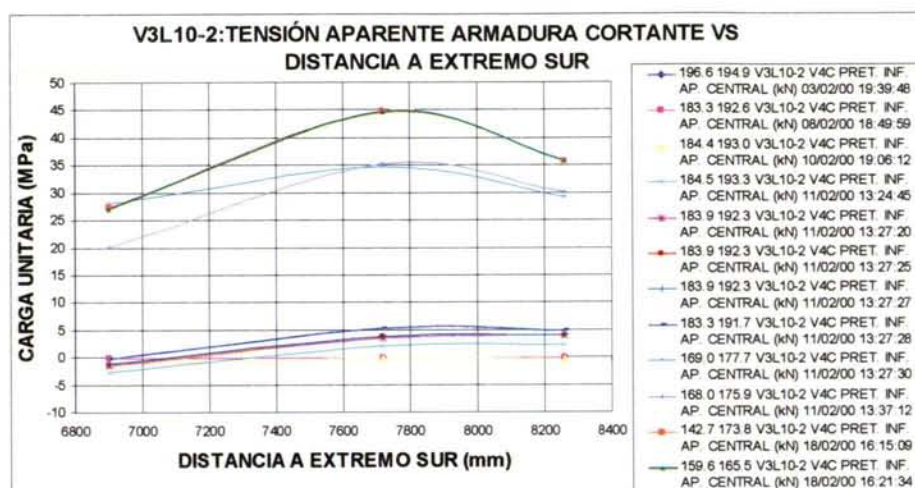
### 10.3.3.3. Viga V3L10-2: c 8 a 15



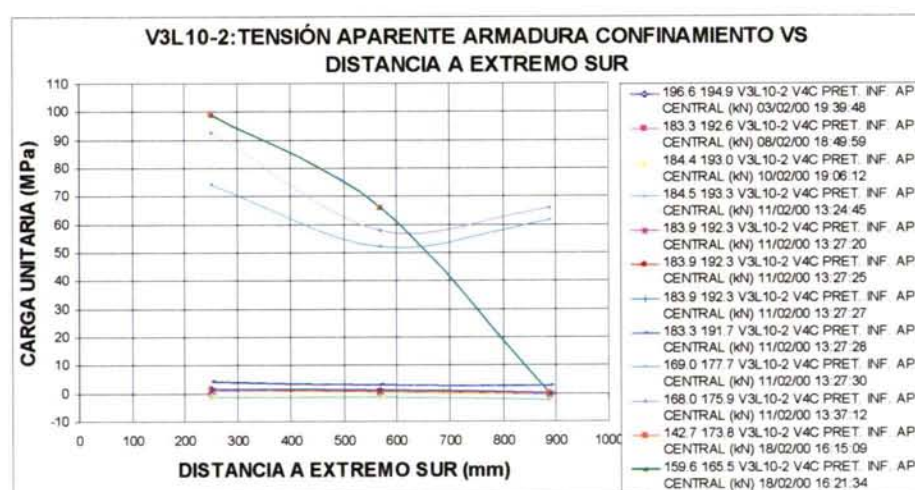
Gráfica 10.3.3.3-1

Tabla 10.3.3.3-1

V3L10-2	C 8 A 15		Fuerza de pretensado estimada (kN)	Fuerza de pretensado estimada (kN)	Pérdidas de pretensado (%)	Pérdidas de pretensado (%)	Diferencia respecto a valor CC (%)	Diferencia respecto a valor CC (%)
			Zona central	Zona central	Zona central	Zona central	Zona central	Zona central
	Fecha	Tiempo transcurrido desde la trans. (días)	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
Fuerza de pretensado inicial	03/02/00		196.1	197.0	0.0	0.0	0.1	-0.2
Tesado definitivo, tras penetración de cuñas	03/02/00		194.1	193.3	1.1	1.9	0.0	0.0
Día hormigonado	08/02/00		190.2	189.9	3.0	3.6		-0.1
Día antes de la transferencia	10/02/00		188.2	189.4	4.1	3.9	-0.4	-0.5
Antes transferencia	11/02/00	0	187.6	190.1	4.3	3.5	3.6	-0.9
Después transferencia	11/02/00	0	171.9	185.0	12.4	6.1		
Estimación tras una semana	18/02/00	7	165.7	183.9	15.5	6.6		



Gráfica 10.3.3.3-2



Gráfica 10.3.3.3-3

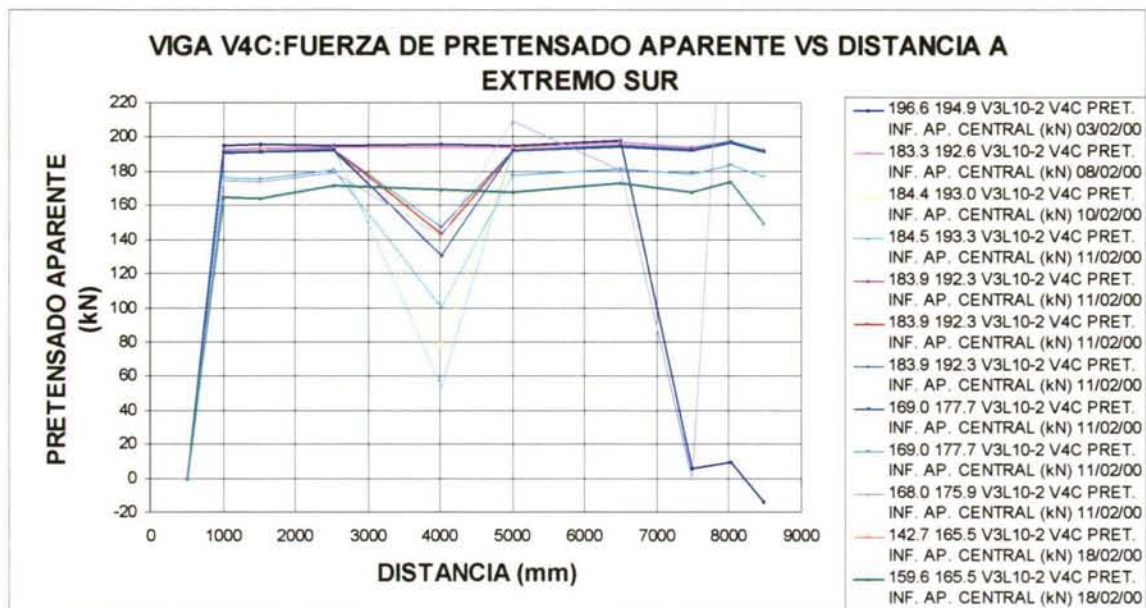
Esta viga, junto con la viga V4C, es la más próxima a la zona de corte. Ambas vigas permanecieron conectadas al SAD durante la transferencia. Por problemas en el archivo de instrumentación sólo se dispone de las medidas tomadas hasta una semana después de la transferencia de pretensado.

En la Tabla 10.3.3.3-1 y Gráficas 10.3.3.3-1 a 10.3.3.3-3 se observa que:

- Las pérdidas de pretensado de la zona central son del 16% para el pretensado inferior y del 7% para el pretensado superior respectivamente.
- Las pérdidas son superiores en la zona Norte de la viga, la zona contigua a la zona de corte.
- La longitud de transmisión aparente del extremo Sur es de 1000 mm aproximadamente.
- Se aprecia el fallo de la galga 1ª.
- La tensión aparente en las armaduras de confinamiento es de 100 MPa, y en la de cortante 45 MPa.



### 10.3.3.4. Viga V4C: c 8 a 15



Gráfica 10.3.3.4-1

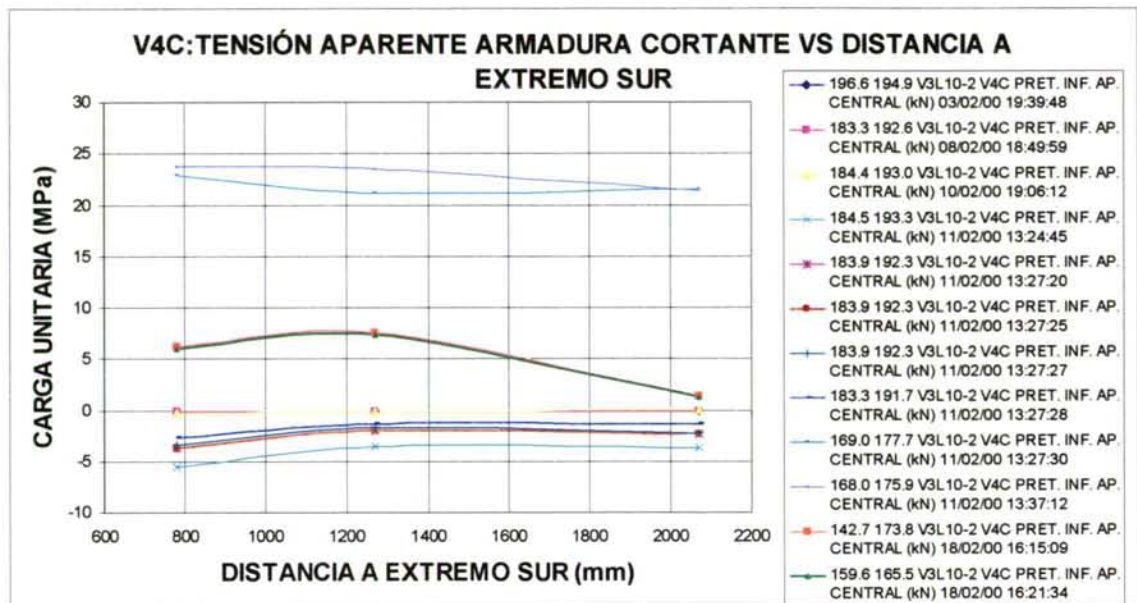
Tabla 10.3.3.4-1

V4C			Fuerza de pretensado estimada (kN)		% pérdidas de pretensado		Diferencia respecto a valor CC	
		Días transcurridos desde la transf.	Zona central		Zona central		Zona central	
			Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
	Fecha		kN	kN	%	%	%	%
Fuerza de pretensado inicial	03/02/00		196.7	199.1	0.0	0.0	-0.2	-1.3
Tesado definitivo, tras penetración de cuñas	03/02/00		194.1	193.6	1.3	2.8	0.0	-0.2
Día hormigonado	08/02/00		190.9	190.3	2.9	4.4		-0.3
Día antes de la transferencia	10/02/00		190.5	189.9	3.2	4.6	-1.6	-0.8
Tras la transferencia	11/02/00	0	173.3	188.9	11.9	5.1	11.0	-0.2
Estimación tras una semana	18/02/00	7	161.9	182.7	17.7	8.2		

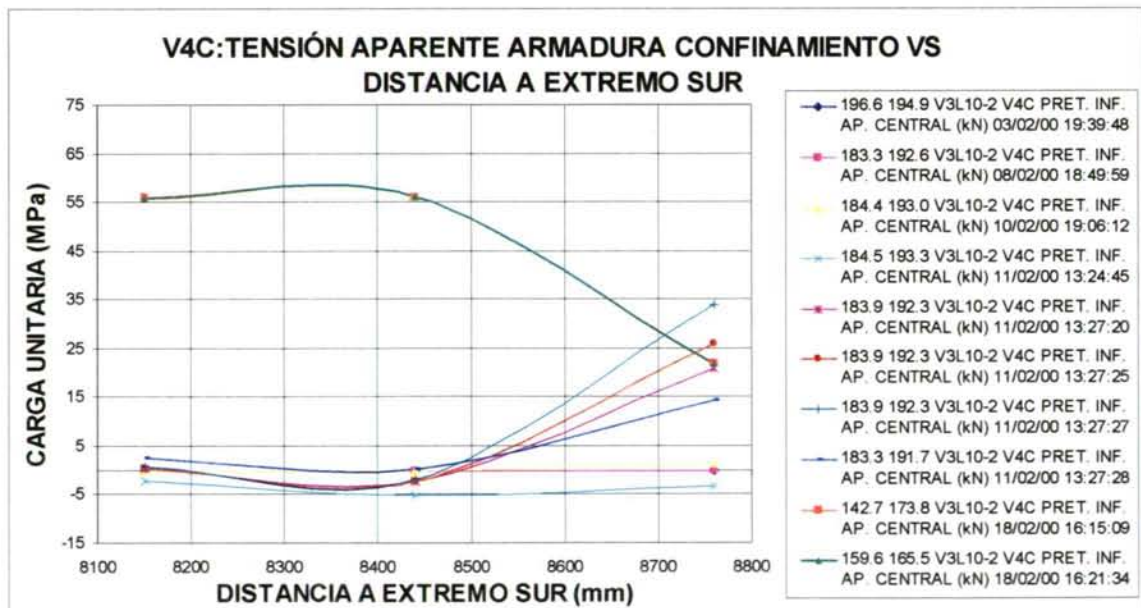
A partir de la Tabla 10.3.3.4-1 y las Gráficas 10.3.3.4-1 a 10.3.3.4-3 se observa que:

- Se aprecia una mayor estabilidad en la fuerza de pretensado a lo largo de la viga, a las diferentes edades.
- La longitud de transmisión aparente es de 1000 mm en ambos extremos.
- Las pérdidas de pretensado de la zona central son del 18% para el pretensado inferior y del 8.2% para el pretensado superior, valores muy similares a los de las vigas de HL10-2.
- La tensión aparente de la armadura a cortante es de 25 MPa como máximo, la mitad de la tensión aparente de la misma armadura de las vigas de HL10-2.
- La tensión aparente de la armadura de confinamiento es de 55 MPa como máximo. Se aprecia un aumento de la tensión de la galga más extrema, probablemente debido a un inicio de fisuración por hendimiento. De todas formas, no se ha detectado, hasta la fecha, fisuración por hendimiento continua.

- Se aprecia el fallo de las galgas 1ª, 5ª, 8ª, 9ª y 10ª.



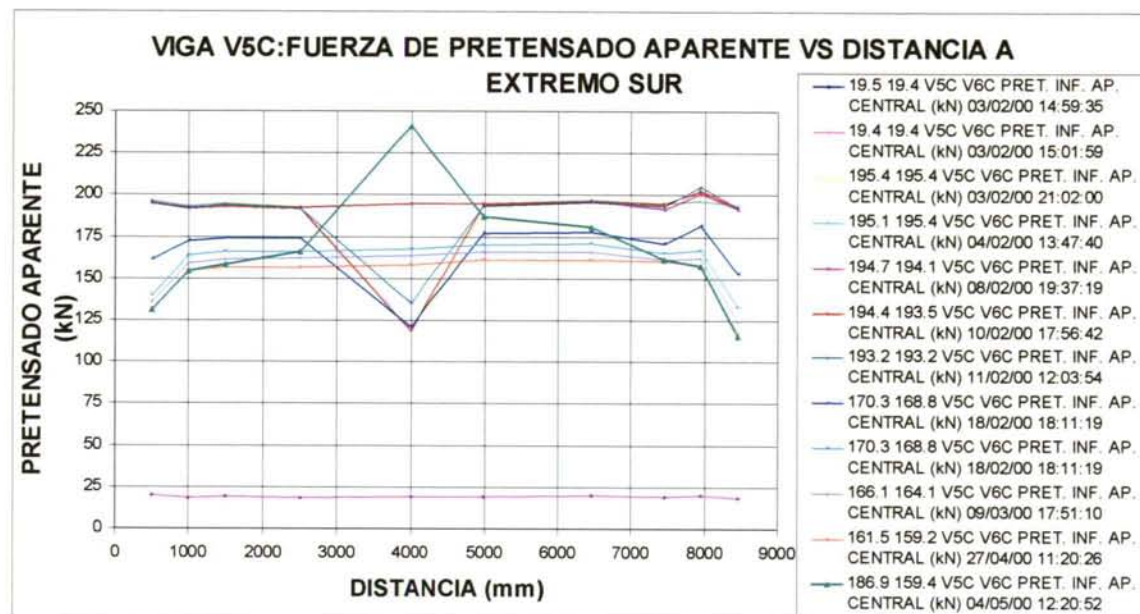
Gráfica 10.3.3.4-2



Gráfica 10.3.3.4-3



### 10.3.3.5. Viga V5C: c 8 a 15



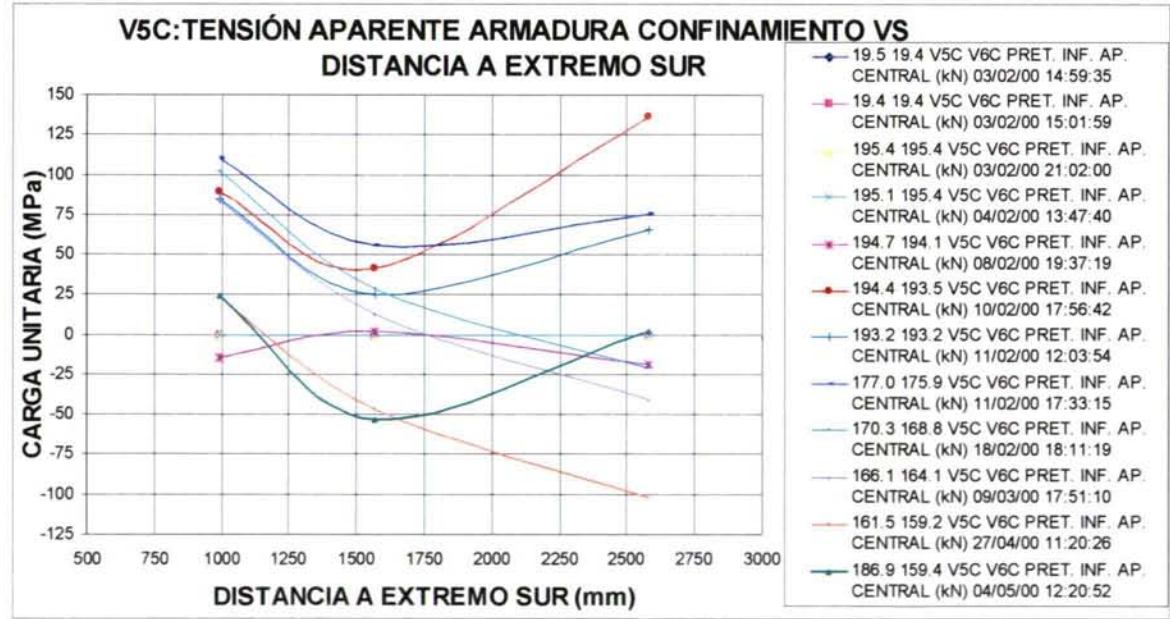
Gráfica 10.3.3.5-1

A partir de la Tabla 10.3.3.5-1 y las Gráficas 10.3.3.5-1 a 10.3.3.5-3 se observa que:

- La estabilidad de las medidas es considerable a lo largo de la viga, para las diferentes edades. La longitud de transmisión aparente en ambos extremos es de 1000 mm aproximadamente en ambos extremos, hasta la última medida.
- Las pérdidas de pretensado de la zona central son del 18% para el pretensado inferior y del 9% para el pretensado superior, valores muy similares a los de la viga precedente.
- La tensión aparente de la armadura de confinamiento es de 140 MPa como máximo en el extremo Sur, el más próximo a la zona de corte.
- La tensión aparente de la armadura de cortante es de 80 MPa como máximo en el extremo Norte. Se detecta fallo de la galga más alejada del extremo Norte.
- Las tensiones originadas son superiores en la zona Sur, precisamente la más próxima a la zona de corte.
- Las tensiones deducidas son elevadas, no tanto como las correspondientes a las vigas de HL10-2. Estas tensiones implican una deformación de tracción apreciable, superior a la deformación de rotura del hormigón a tracción. Esto indica que el hormigón que rodea a las armaduras instrumentadas está microfisurado, aunque las microfisuras que afloran a la superficie no estén interconectadas entre sí.
- Se produce el fallo de la galga 5ª, a los cinco meses.

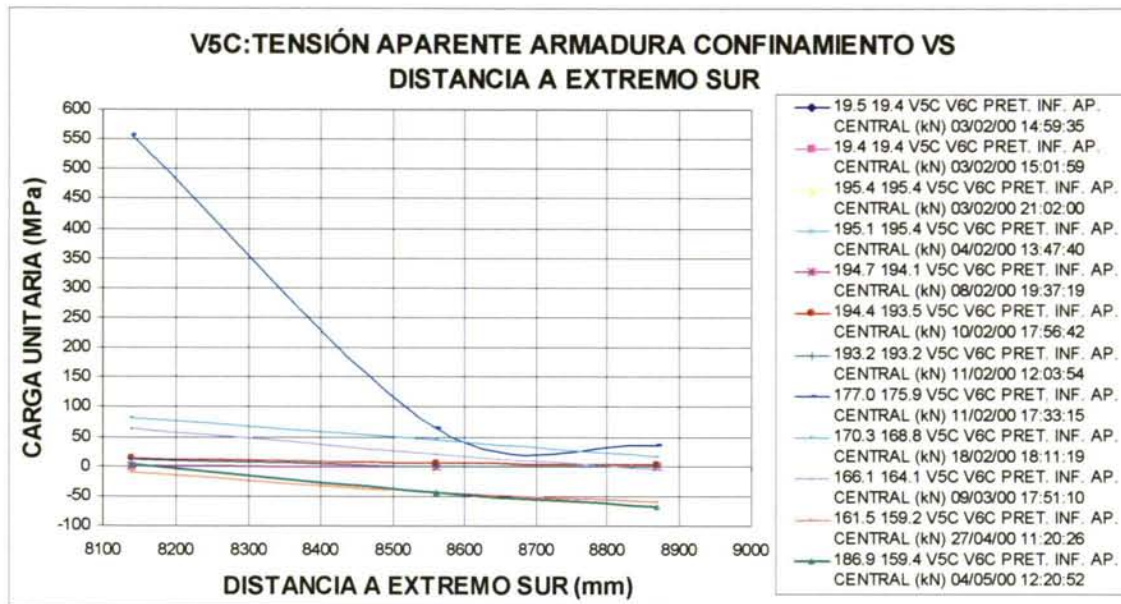
Tabla 10.3.3.5-1

V5C			Galga pretensado inferior 05 (57)	Galga pretensado inferior 06 (58)	Galga pretensado superior 11 (63)	Galga pretensado superior 12 (64)	Galga pretensado inferior 05 (57)	Galga pretensado inferior 06 (58)	Galga pretensado superior 11 (63)	Galga pretensado superior 12 (64)
Distancia desde el extremo Sur (mm)			4000	4990	4000	4990	4000	4990	4000	4990
Cordón			2	2	4	4	2	2	4	4
	Fecha inicio	Tiempo transcurrido desde la trans. (días)	Fuerza de pretensado estimada (kN)	Fuerza de pretensado estimada (kN)	Fuerza de pretensado estimada (kN)	Fuerza de pretensado estimada (kN)	% pérdidas de pretensado	% pérdidas de pretensado	% pérdidas de pretensado	% pérdidas de pretensado
Tesado provisional	03/02/00		19	19	18	18				
Fuerza de pretensado inicial	03/02/00		195	195	193	193	0.0	0.0	0.0	0.0
Tesado definitivo, tras penetración de cuñas	04/02/00		192	192	190	189	1.7	1.6	1.7	1.9
Día hormigonado	08/02/00		194	194	192	191	0.7	0.8	0.8	1.0
Día antes de la transferencia	10/02/00		102	194	192	191	47.8	0.9	0.4	0.9
Antes transferencia	11/02/00		114	193	192	191	41.7	1.1	0.5	0.9
Después transferencia	11/02/00	0	120	177	186	185	38.8	9.4	3.8	4.1
Estimación tras una semana	18/02/00	7	168	170	183	183	14.1	13.0	5.5	5.5
Estimación tras un mes	09/03/00	27	163	166	179	179	16.4	15.2	7.3	7.4
Estimación tras dos meses y medio	27/04/00	76	158	161	176	175	19.1	17.5	9.1	9.2
Estimación tras cinco meses	04/05/00	83	241	187	162	165	-23.5	4.3	16.3	14.8



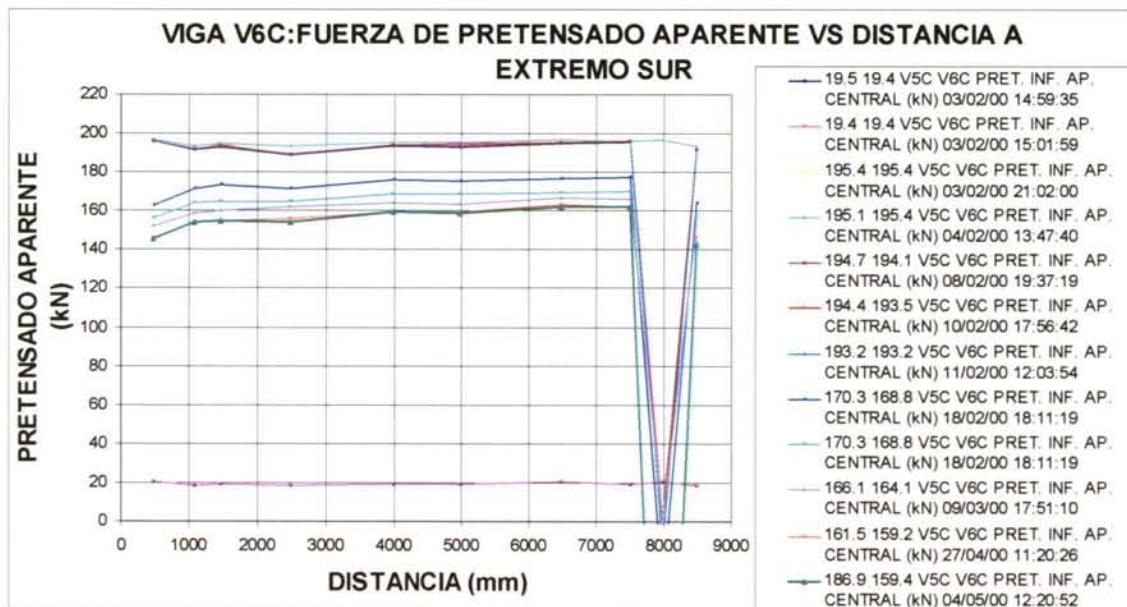
Gráfica 10.3.3.5-2





Gráfica 10.3.3.5-3

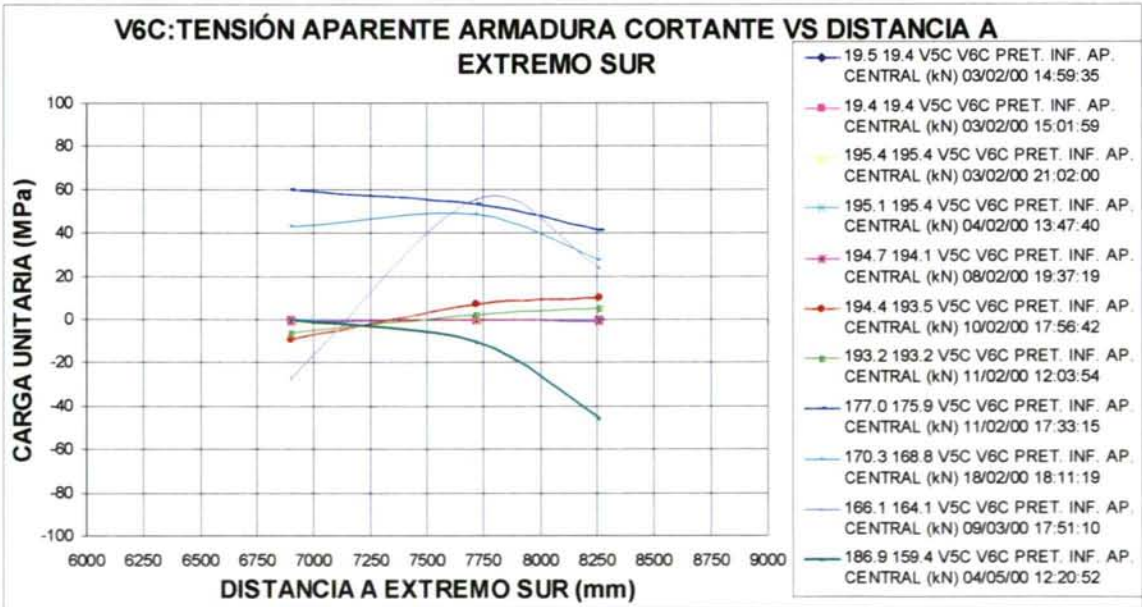
### 10.3.3.6. Viga V6C: c 8 a 15



Gráfica 10.3.3.6-1

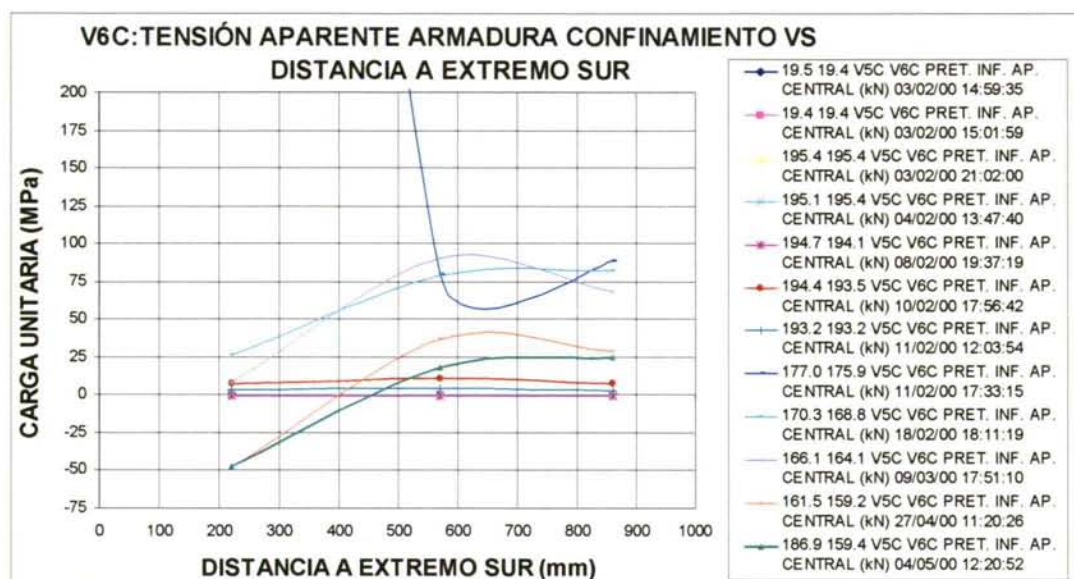
Tabla 10.3.3.6-1

V6C			Galga pretensado inferior 05 (20)	Galga pretensado inferior 06 (21)	Galga pretensado inferior 10 (26)	Galga pretensado inferior 10 (27)	Galga pretensado inferior 05 (20)	Galga pretensado inferior 06 (21)	Galga pretensado inferior 10 (26)	Galga pretensado inferior 10 (27)
Distancia desde el extremo Sur (m)			3990	4980	4020	5010	3990	4980	4020	5010
Cordón			2	2	4	4	2	2	4	4
		Tiempo transcurrido desde la trans. (días)	Fuerza de pretensado estimada (kN)	Fuerza de pretensado estimada (kN)	Fuerza de pretensado estimada (kN)	Fuerza de pretensado estimada (kN)	% pérdidas de pretensado	% pérdidas de pretensado	% pérdidas de pretensado	% pérdidas de pretensado
Tesado provisional	03/02/00		20	19	19	19				
Fuerza de pretensado inicial	03/02/00		195	195	195	195	0.0	0.0	0.0	0.0
Tesado definitivo, tras penetración de cuñas	04/02/00		193	192	192	192	1.3	1.6	1.6	1.7
Día hormigonado	08/02/00		193	194	194	194	1.2	0.9	0.7	0.9
Día antes de la transferencia	10/02/00		194	193	194	194	0.9	1.3	0.7	0.6
Antes transferencia	11/02/00	0	194	193	194	194	1.0	1.4	0.6	0.7
Después transferencia	11/02/00	0	176	175	188	187	9.7	10.2	3.9	4.1
Estimación tras una semana	18/02/00	7	169	168	185	184	13.6	13.9	5.3	5.6
Estimación tras un mes	09/03/00	27	164	163	182	182	16.0	16.4	7.0	6.6
Estimación tras dos meses y medio	27/04/00	76	159	159	177	176	18.7	18.7	9.5	9.8
Estimación tras cinco meses	04/05/00	83	160	159	177	177	18.3	18.6	9.2	9.6



Gráfica 10.3.3.6-2





Gráfica 10.3.3.6-3

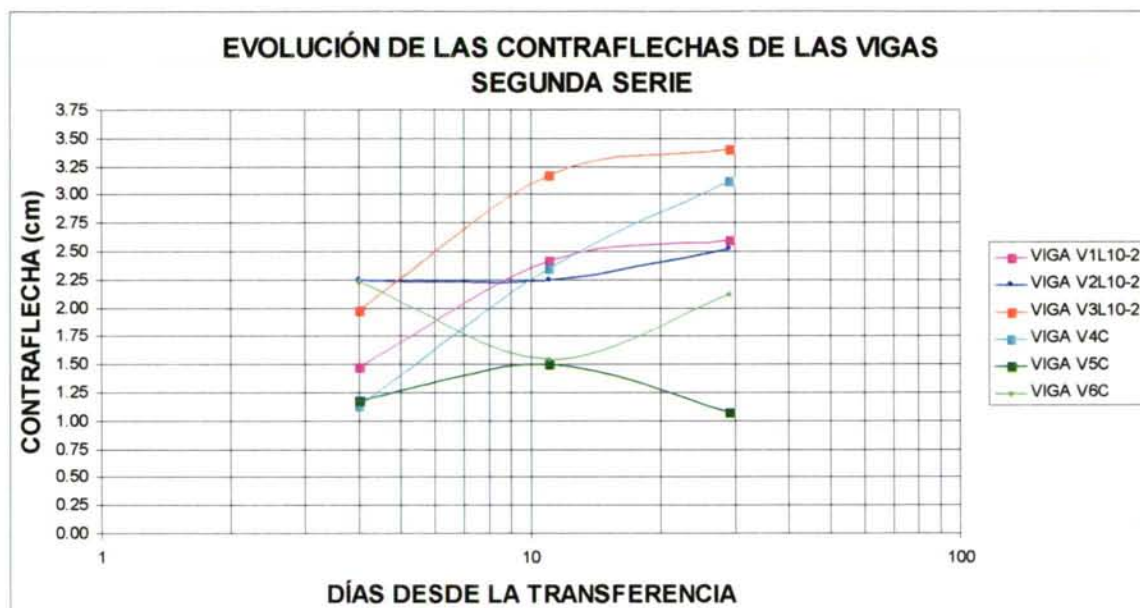
A partir de la Tabla 10.3.3.6-1 y las Gráficas 10.3.3.6-1 a 10.3.3.6-3 se deduce:

- La estabilidad de las medidas es considerable a lo largo de la viga, para las diferentes edades. La longitud de transmisión aparente en el extremo Sur es de 1000 mm como máximo.
- Las pérdidas de pretensado de la zona central son del 18.5% para el pretensado inferior y del 9.4% para el pretensado superior, valores muy similares a los de la viga precedente.
- La tensión aparente de la armadura de confinamiento es de 60 MPa como máximo en el extremo Sur, el más próximo a la zona de corte.
- La tensión aparente de la armadura de confinamiento es de 80 MPa como máximo en el extremo Norte.
- Las tensiones deducidas son elevadas, del orden de la mitad de las deducidas para las vigas de HL10-2. Estas tensiones implican una deformación de tracción apreciable, superior a la deformación de rotura del hormigón a tracción. Esto indica que el hormigón que rodea a las armaduras instrumentadas está microfisurado, aunque las microfisuras que afloran a la superficie no estén interconectadas entre sí.

#### 10.3.4. CONTRAFLECHAS TRAS LA TRANSFERENCIA Y DETECCIÓN DE LA FISURACIÓN

La medida de las contraflechas en bancada es un proceso sencillo. La precisión de la medida es de 1 mm. En la Gráfica 10.3.4-1 aparecen las contraflechas medidas tras la transferencia, y a medida que pasaba el tiempo en el laboratorio.

Las contraflechas medidas tras la transferencia de pretensado están comprendidas entre 1.25 y 2.25 cm. A medida que pasa el tiempo estos valores aumentan, al mes de la fabricación las contraflechas están comprendidas entre 1.5 y 3.4 cm, y la dispersión aumenta.



Gráfica 10.3.4-1

Se puede observar que en dos de las tres vigas de hormigón convencional la contraflecha media es considerablemente inferior a las de las vigas de hormigón ligero.

Las contraflechas máximas transcurrido un mes de la transferencia corresponden a las vigas contiguas a la zona de corte. Estimamos que la precisión de medida de las flechas según el proceso descrito no es superior a 5 mm.

Se han calculado las contraflechas instantáneas teóricas, que se reflejan en la Tabla 10.3.4-1, con la siguiente notación:

$E_{cm,j}$	módulo de deformación secante medio del hormigón a la edad de transferencia
$P_i(j)$	fuerza de pretensado inferior a la edad de transferencia
$P_s(j)$	fuerza de pretensado superior
$P_{total}(j)$	fuerza de pretensado total
$e_{eq}(j)$	excentricidad equivalente del pretensado a la edad de transferencia
$q$	peso propio de la viga
$\sigma_c(v)$	tensión en el hormigón, en la fibra superior, a la edad de transferencia
$\sigma_c(v')$	tensión en el hormigón, en la fibra inferior, a la edad de transferencia
$f_{CL}^*(j)$	contraflecha teórica a la edad de transferencia
$f_{CL}(j)$	contraflecha real a la edad de transferencia

Los valores de contraflechas teóricos se han deducido aplicando la teoría elástica, teniendo en cuenta los valores de:



- Las características geométricas de la sección bruta.
- Los valores de las tensiones deducidas con la hipótesis de material elástico, distribución de tensiones lineal en la sección no fisurada. Previamente a la estimación de la contraflecha teórica, comprobamos que no se generan tracciones en la sección de hormigón, por encima de la resistencia a tracción.
- Las fuerza de pretensado estimada inmediatamente tras la transferencia, superior e inferior. Se adopta la simplificación de que el pretensado genera un momento flector negativo constante a lo largo de la viga, correspondiente a la totalidad de la fuerza de pretensado de la zona central. Esto no es cierto en la longitud de transmisión.
- Módulo de deformación secante del hormigón determinado experimentalmente el día de la transferencia.
- Peso propio de las vigas, estimado con el de las vigas ensayadas a flexión, “pesadas” con las células de carga de los apoyos antes del ensayo. Dado que el pretensado tiene excentricidad negativa (según nuestro criterio de signos), calculamos el momento de peso propio considerando la viga biapoyada en sus extremos.

Con la Tabla 10.3.4-1 se observa que:

- Las tensiones estimadas tras la transferencia en las fibras superior e inferior de la sección, están comprendidas en el intervalo  $-0.4f_{cm,j} \leq \sigma_e \leq 0$ , por lo que no aparecen tracciones ni compresiones excesivas.
- La dispersión de las flechas instantáneas es superior en las vigas de HC que en las vigas de HL10-2.

Comparando las contraflechas instantáneas de las vigas de la primera serie y de la segunda, estas son muy similares, entre 1.5 y 2.3 cm la primera, y entre 1.5 y 2.25 la segunda.

Teniendo en cuenta que la relación entre módulos de deformación del HL10-2 y del HL10-1 a las edades de transferencia respectivas, es de 7/10, serían de esperar contraflechas en el HL10-1, primera serie, del orden del 40% superiores a las de la segunda serie.

La fecha de detección de las fisuras por hendimiento, está reflejada en la Tabla 10.3.4-2.

Tabla 10.3.4-2

Viga	Días transcurridos desde la transferencia hasta la detección de las fisuras visibles		
	Norte	Sur	Generalización a toda la longitud
V1L10-2	18	18	41
V2L10-2	5	18	42
V3L10-2	18	18	43
V4C	NO	NO	NO
V5C	NO	NO	NO
V6C	NO	NO	NO

Tabla 10.3.4-1

VIGA	$E_{cm,j}$	$P_i$	$P_s$	$P_{total}$	$e_{eq}$	$q$	$\sigma_c(v)$	$\sigma_c(v')$	Flecha teórica pretensado	Flecha teórica peso propio	Flecha teórica $f^*_{CL}(j)$	Flecha real $f_{CL}(j)$	$\frac{f_{CL}(j)}{f^*_{CL}(j)}$
	MPa	kN	kN	kN	m	kN	MPa	MPa	m	m	m	m	m
V1L10-2	27230	174.5	185.5	709.0	-0.078	1.83	-1.97	-15.76	-0.019	0.005	-0.014	-0.018	1.29
V2L10-2	27230	174.5	185.5	709.0	-0.078	1.83	-1.96	-15.76	-0.019	0.005	-0.014	-0.020	1.44
V3L10-1	27230	165.7	183.9	681.2	-0.076	1.83	-2.32	-14.71	-0.018	0.005	-0.013	-0.016	1.27
V4C	28094	164.3	188.3	681.1	-0.074	2.08	-3.02	-14.01	-0.017	0.006	-0.011	-0.008	0.72
V5C	28094	177.0	185.5	716.5	-0.079	2.08	-2.33	-15.59	-0.019	0.006	-0.013	-0.014	1.07
V6C	28094	175.5	187.5	714.0	-0.078	2.09	-2.47	-15.38	-0.019	0.006	-0.013	-0.020	1.56



10.3.5. PENETRACIÓN DE LOS CORDONES DE PRETENSADO

Como se expone en el Capítulo 2, diversos autores han destacado la conveniencia de medir la penetración del pretensado durante la transferencia, como un parámetro de calidad de la adherencia del hormigón y el pretensado.

En la segunda serie, la medida de la penetración de los cordones de pretensado en los extremos de las vigas se realizó mediante dos métodos:

- 1. Durante la transferencia, colocando varios transductores de desplazamiento sujetos al cordón de pretensado mediante pinzas elásticas.

Tabla 10.3.5-1: Penetración del cordón de pretensado

Viga	Viga V2L10-2			Viga V4C	
Extremo	Norte			Sur	
Cordón	1	2	3	2	1
Mínimo	0.04	2.28	2.03	2.46	1.31
Máximo	0.05	2.36	2.18	2.54	1.46
Medio	0.04	2.32	2.10	2.50	1.38

- 2. Medida manual: Se coloca previamente a la transferencia, una cinta aislante alrededor del cordón, a una distancia de aproximadamente 30 mm. Se mide la distancia entre el borde de la cinta y el extremo de la viga con un calibre de profundidad. Tras la transferencia, se efectúa el mismo proceso (CHON91). La precisión del calibre es de 0.05 mm, pero estimamos que la precisión de la medida es menor, de 0.5 mm aproximadamente, debido a la dificultad de la medida y al giro experimentado por el cordón de pretensado durante la transferencia.

Tabla 10.3.5-2

Viga	Extremo	Cordón 1	Cordón 2	Cordón 3	Media
V1L10-2	Sur	0.44	2.23	2.29	1.65
V2L10-2	Sur	2.49	1.38	2.39	2.09
V2L10-2	Norte	1.98	2.33	1.98	2.10
MEDIA HL		1.64	1.98	2.22	
V5C	Sur	1.79	2.53	2.04	2.12
V5C	Norte	0.13	2.43	0.28	0.95
V6C	Norte	1.78	1.03	1.28	1.37
MEDIA HC		1.24	2.00	1.20	
MEDIA HL/HC		0.75	1.01	0.54	

Esta medida ha de corregirse mediante la expresión del Apartado 6.1 para tener en cuenta que, durante la transferencia se producen dos efectos: la penetración del cordón, y el acortamiento de la longitud inicial de cordón medida.

Esta corrección se ha aplicado a las medidas tomadas mediante ambos sistemas, con los datos de la fuerza de pretensado proporcionados por las células de carga.

Realmente la precisión de ambos sistemas es similar, de décimas de milímetros, debido a que en el primer caso hay una incertidumbre en la distancia entre la pinza de sujeción, de 20 mm de espesor, y el paramento de la viga. Una ventaja del primer método es que

permite evaluar el crecimiento de la penetración a medida que se transfiere el pretensado. Hemos comprobado que los dos sistemas proporcionan valores muy similares.

En las Gráficas 10.3.5-1, 10.3.5-3, 10.3.5-5 y 10.3.5-7, que representan {deslizamiento} respecto al {tiempo}, se aprecian dos “picos” correspondientes a la transferencia, que interpretamos como una señal falsa derivada de la transferencia tan súbita, a consecuencia del choque.

En las Gráficas 10.3.5-2, 10.3.5-4, 10.3.5-6 y 10.3.5-8 se representa el deslizamiento respecto al porcentaje de carga transferida.

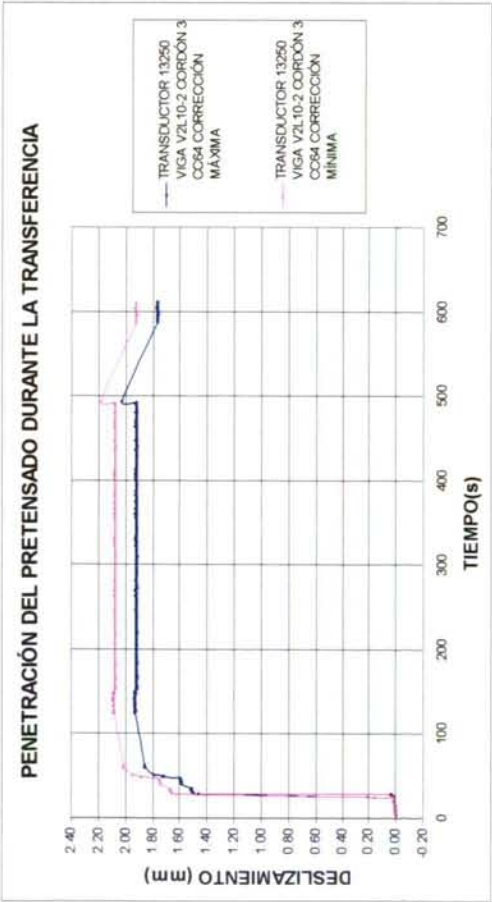
A la vista de las gráficas de penetración respecto al tiempo, hay que destacar que la penetración del pretensado, si bien comienza en la transferencia, continúa durante los minutos siguientes a la misma, a medida que va fisurando el hormigón debido a las tensiones originadas durante la transferencia.

Este fenómeno es más acusado en el caso del hormigón ligero, lo que confirma la tendencia de este material a sufrir procesos de agotamiento diferidos.

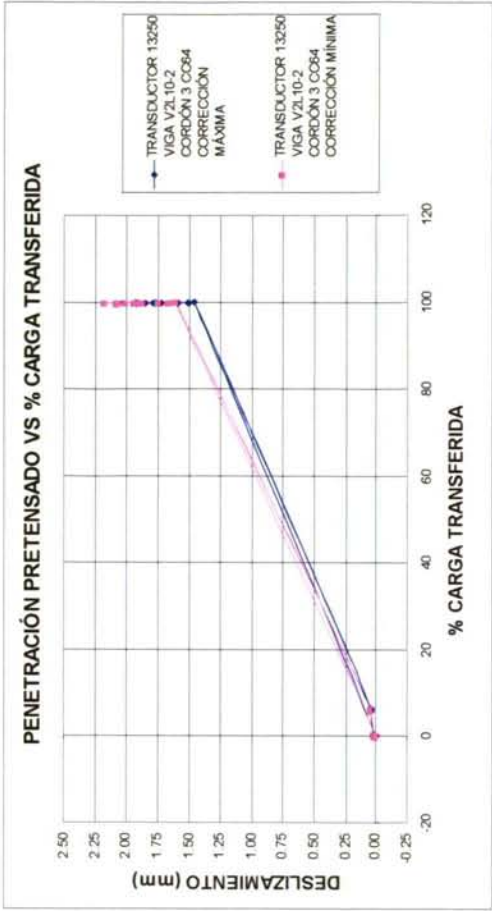
De los resultados obtenidos se concluye que:

- Los valores de penetración del pretensado tras la transferencia son similares entre ambos materiales, aunque ligeramente superiores en el caso del HL10-2.
- La estabilización del valor de la penetración se produce en los primeros dos minutos en el caso del HL10-2, y en el primer minuto en el caso del HC. La penetración en la viga de HL10-2 se produce de manera más gradual que la detectada en la viga de HC.
- Atendiendo únicamente al valor de la penetración para evaluar la calidad de la adherencia, se deduciría que ambos materiales presentan una adherencia similar, más elevada en el caso del HC. Sin embargo, la adherencia elevada conlleva un mayor gradiente de la fuerza de pretensado en el extremo de la viga, lo que conduce a la aparición de tensiones de tracción más elevadas en esta zona. La adherencia se mantendrá si el material es capaz de resistir estas tensiones tan elevadas. Si las tensiones superan la capacidad resistente a tracción instantánea o diferida (teniendo en cuenta el cansancio) se generará fisuración por hendimiento.
- La medida de la penetración, a la vista de esto, no es suficiente para garantizar un control de la adherencia, debido al riesgo de fisuración por hendimiento diferida.

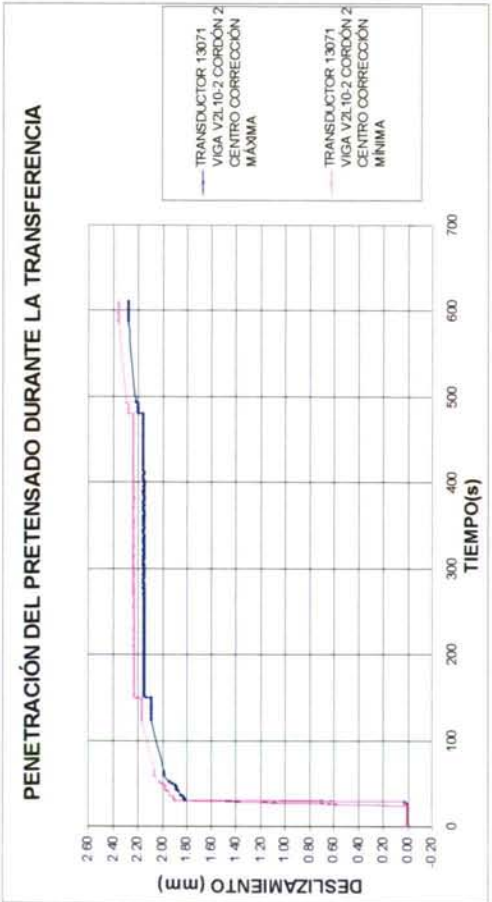




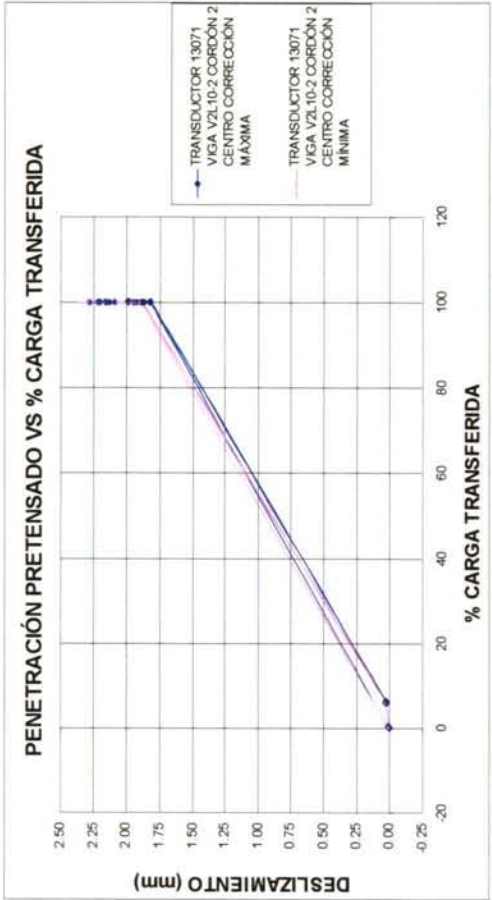
Gráfica 10.3.5-1



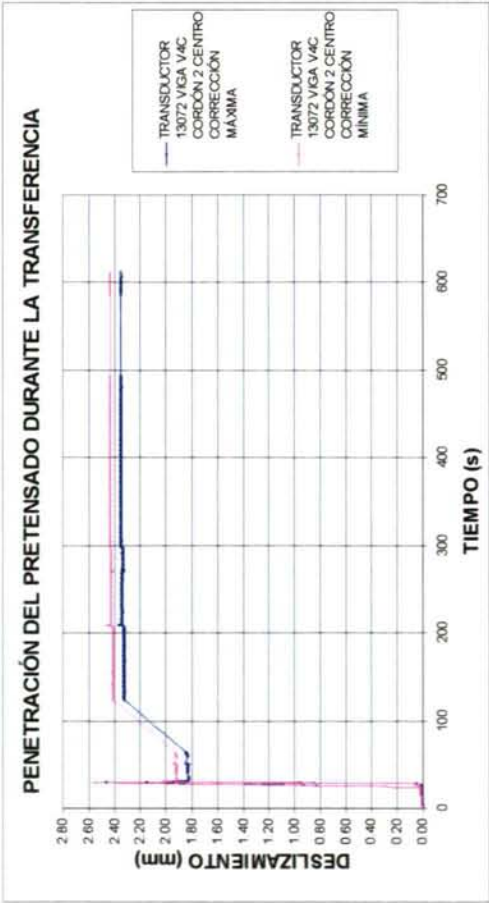
Gráfica 10.3.5-2



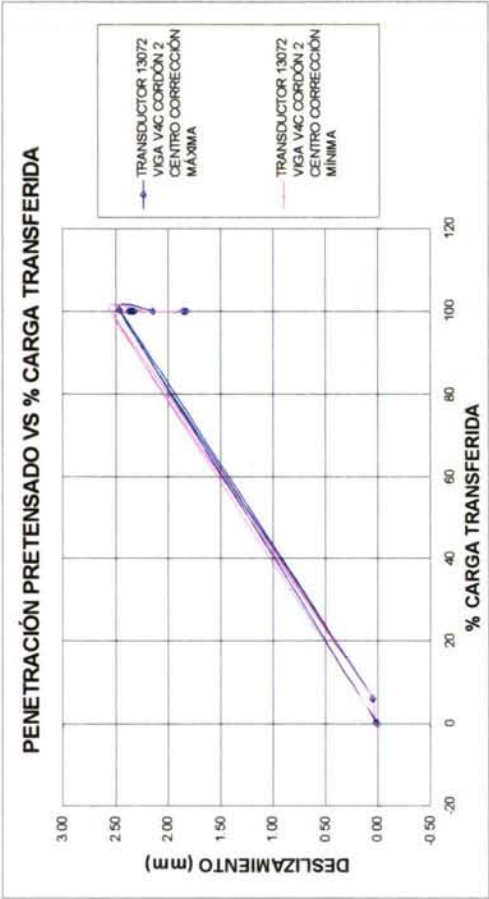
Gráfica 10.3.5-3



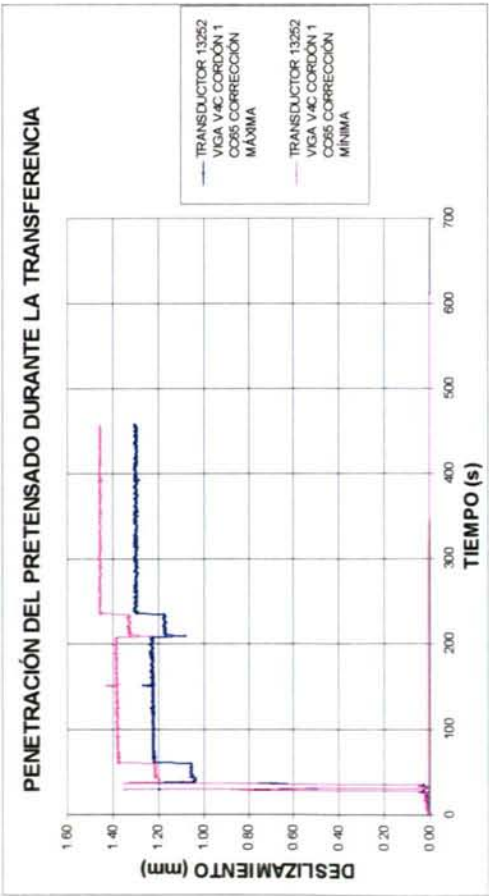
Gráfica 10.3.5-4



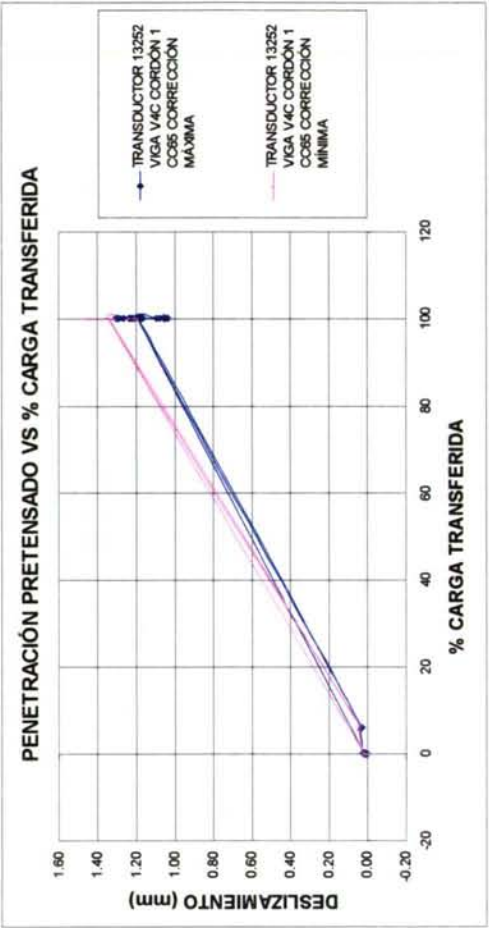
Gráfica 10.3.5-5



Gráfica 10.3.5-6



Gráfica 10.3.5-7



Gráfica 10.3.5-8



### 10.3.6. COMPARACIÓN ENTRE LAS PÉRDIDAS DE LOS DIFERENTES MATERIALES

Respecto a las vigas de HL10-1, las pérdidas del pretensado inferior de la zona central varían entre el 16 y el 22%. Parece que la viga de mayor cuantía de armadura de confinamiento presenta las menores pérdidas, apreciándose que la longitud de transmisión aparente de ambos lados no parece superar el metro.

Hay que tener en cuenta que la fisuración por hendimiento puede provocar pérdidas de pretensado generalizadas a lo largo de toda la viga, de modo que la fuerza de pretensado transferida realmente disminuya, con lo que la longitud de transmisión aparece falseada: estamos transfiriendo una fuerza de pretensado menor debido a la fisuración por hendimiento.

Por otra parte hay que señalar el riesgo que supone la fisuración por hendimiento: si ésta genera pérdidas adicionales en el pretensado inferior, pérdidas que no se producen en el cordón superior, se genera un desplazamiento de la resultante de la fuerza de pretensado, que avanza hacia el centroide de la sección, disminuyendo la capacidad resistente de las vigas. La armadura de confinamiento parece efectiva, pues aunque no previene la fisuración longitudinal, por lo menos limita la abertura de fisura y las pérdidas de pretensado. Las pérdidas de la viga V3L10-2 son del orden de magnitud de las pérdidas de las vigas de HC y de HL10-2.

Respecto a las vigas de HL10-2, se aprecia en las gráficas de la fuerza de pretensado aparente el aumento de la longitud de transmisión con el tiempo, apreciándose longitudes de transmisión aparentes de 1500 mm (viga V2L10-2, Sur) e incluso de 2500 mm (viga V1L10-2, Norte y Sur).

En las vigas de hormigón convencional, sin embargo, las longitudes de transmisión no parecen superar en ningún caso el metro, en ambos extremos. Se aprecia una mayor estabilidad de la fuerza de pretensado en los extremos de las vigas.

Por lo que respecta a las tensiones de trabajo aparentes de la armadura de confinamiento en las vigas de HL10-2 y de HC, los valores son del mismo orden de magnitud, aunque bastante superiores para las vigas de HL10-2. Esto indica que el HC es más capaz de absorber tensiones de tracción que el HL10-2. De todos modos, los valores determinados son lo suficientemente elevados como para presumir que en ambos tipos de viga se produce fisuración por hendimiento.

Sólo se aprecian las fisuras de hendimiento generalizadas en las vigas de HL10-2. En las vigas de HC se aprecian microfisuras longitudinales aisladas en la cara inferior, apenas visibles, de longitud moderada. Creemos que la diferencia estriba en que el HL10-2 no es capaz de frenar la fisuración, de modo que las fisuras se conectan entre sí y avanzan hasta abarcar toda la longitud de la viga, mientras que en el caso del HC las fisuras no progresan.

Así como las pérdidas de pretensado inferior de las vigas de HL10-1 rondan el 20% en la zona central, las vigas de HC y de HL10-2 presentan valores más reducidos, en ambos casos de alrededor del 16% a los tres meses desde la fabricación. Esto es debido a la mayor rigidez de estos materiales, de módulo de deformación considerablemente



superior al HL10-1. También puede influir el peso propio, cuanto mayor es la densidad menores son las pérdidas de pretensado inferior.

Los valores similares de pérdidas en las vigas de HL10-2 y de HC parecen indicar que, una vez transcurridos tres meses desde la fisuración longitudinal de las vigas de HL10-2, no se han producido todavía pérdidas de pretensado generalizadas a lo largo de toda la viga.

Sin embargo, probablemente, a lo largo del tiempo y en presencia de solicitaciones alternadas de uso, estas pérdidas tenderían a aumentar en las vigas de HL10-2, poniendo en peligro la capacidad resistente de estos elementos. Además la fisuración longitudinal supone una vía de acceso para los agentes corrosivos, por lo que es incompatible con las exigencias de durabilidad.

Por lo que respecta al pretensado superior, las pérdidas de pretensado rondan el 8% para las vigas de HL10-2 y el 9.5% para las vigas de HC. Estas mayores pérdidas en las vigas de HC pueden estar motivadas por el mayor peso propio del hormigón convencional.

A pesar de haber distribuido la armadura de cortante en forma de estribos abiertos, para evitar confinamiento del hormigón, se constata deformaciones de la armadura pasiva del orden del 50% de las que experimenta la armadura de confinamiento tras la transferencia. De esto se deduce que la armadura de cortante contribuye a absorber tensiones de hendidamiento.

De todas formas, los valores de deformación de la armadura de confinamiento correspondientes a las vigas de HC superan la deformación de rotura a tracción del hormigón, lo que indica aparición de fisuras. Esta fisuración no aflora a la superficie o, si lo hace, es en forma de microfisuras que no se conectan entre sí. Este efecto creemos que se debe a la elevada resistencia de los áridos convencionales, que actúan de freno de las fisuras, impidiendo su propagación. Realmente los hormigones ligeros ensayados presentan un mortero muy similar al del hormigón convencional, la diferencia entre ambos tipos de material radica en el diferente árido grueso: árido ligero/frágil respecto a árido convencional/rígido-resistente.

Las pérdidas de pretensado medidas en las vigas, en la zona central, son del mismo orden de magnitud en los tres materiales, para la máxima cuantía de armadura de confinamiento. Las diferencias en parte se deben a la diferencia de densidad de estos materiales. A mayor densidad, menor pérdidas en el pretensado inferior, y mayores en el superior.

Las pérdidas de pretensado en los extremos de la viga son superiores en el caso de las vigas de hormigón ligero, se aprecia un avance de la longitud de transmisión con el tiempo. Este fenómeno es más acusado en el caso del hormigón ligero, lo que confirma la tendencia de este material a sufrir procesos de agotamiento por cansancio.

La instrumentación presenta un comportamiento mejor en la segunda serie que en la primera serie, creemos que debido a la experiencia adquirida, y ello a pesar de las circunstancias meteorológicas adversas, como corresponde al mes de febrero (bajas temperaturas, elevada humedad ambiental), poco favorables para el empleo de



adhesivos no hidráulicos, para la asepsia necesaria durante la colocación de instrumentación.

Dado lo reducido del número de vigas consideradas, no se aprecia una diferencia significativa entre las pérdidas de las vigas más cercanas a la zona de corte y las que están más alejadas.

En algunas vigas se aprecian mayores pérdidas en el extremo más contiguo a la zona de corte, que en el opuesto.

### 10.3.7. CONCLUSIONES

Finalmente hay que destacar que, a pesar de la modificación de la dosificación del hormigón ligero, que convierte el hormigón HL10-2 en semiligero (densidad de equilibrio superior a  $2.0 \text{ T/m}^3$ ):

- Las vigas de hormigón ligero experimentan fisuración por hendimiento. El material es incapaz de frenar la propagación de fisuras de hendimiento, a pesar de la armadura de confinamiento. Al cabo de varias semanas todas las vigas fisuraron a lo largo de toda su longitud.
- Las vigas de hormigón convencional no presentaron hasta la fecha fisuración continua por hendimiento.
- La fisuración por hendimiento constituye un serio peligro para la seguridad de las vigas, puesto que puede provocar el aumento de la longitud de transmisión a lo largo de la vida útil, y, por lo tanto, de la longitud de anclaje total pudiendo incluso producirse pérdidas de pretensado en toda la longitud del elemento.
- Aún en el caso de que se estabilizase la longitud de anclaje, estas fisuras son inadmisibles, por constituir una vía de acceso generalizado de agentes agresivos a la armadura activa, con el consiguiente peligro de corrosión bajo tensión.

## 10.4. ANÁLISIS DE LA ZONA DE TRANSMISIÓN DE PRETENSADO

### 10.4.1. INTRODUCCIÓN

La fuerza de pretensado de la zona central varía con la edad, desde el momento de la transferencia, en el que toma el valor  $P_3$ . De ahí en adelante su valor disminuye paulatinamente con el tiempo, tomando en cada instante el valor  $P(t)$ .

La longitud de transmisión se puede determinar de una manera indirecta y, ciertamente imprecisa, mediante la medida de las deformaciones de la superficie lateral del hormigón, a la altura del centro de gravedad del pretensado. Para interpretar los resultados de las deformaciones medidas, hay que tener en cuenta los diferentes factores:

- Cada una de las medidas de la deformación es una media de las deformaciones a lo largo de la longitud de medida. De esta forma, suponiendo que la ley de crecimiento fuese lineal, hasta alcanzar el máximo  $P(t)$ , realmente la ley que estaríamos

obteniendo sería una ley “suavizada” al final de la longitud de transmisión. Este hecho conduce a una longitud de transmisión aparente superior a la real (FHWA94).

- Hemos empleado extensómetros de 100, 150 y 300 mm de longitud base, con relojes comparadores de 0.002 mm de precisión. Supuesto el brazo de palanca de la parte móvil del extensómetro 1:1 (varía en cada modelo), la precisión mínima de la medida de deformación es de  $2E-5$ , o 20 ue; valor que nos proporciona un orden de magnitud de la sensibilidad de la medida.
- La superficie de hormigón donde estamos determinando las deformaciones dista del cordón de pretensado un valor igual al recubrimiento del mismo. Por ello, debido al efecto Saint-Venant existe un retraso de la ley de deformaciones del hormigón respecto a la ley de deformaciones del pretensado. Por este motivo realmente estaremos sobrestimando la longitud de transmisión real (FHWA94).
- El cordón de pretensado está conformado por alambres arrollados alrededor de otro alambre central recto. Esta forma helicoidal altera el campo de deformaciones medidas en la superficie del hormigón cercana, generando ondulaciones.
- El hormigón es un material que fluye con el tiempo, por lo que, una vez producida la transferencia, a la deformación instantánea se le suma la deformación por fluencia y retracción. Por ello la determinación de la fuerza de pretensado presente en la viga en cada momento es inviable si disponemos sólo de esta información.
- El extremo de la viga más cercano a la zona de corte de pretensado es a priori el más dañado, lo que introduce una asimetría en la ley de deformaciones medida a lo largo de la viga.
- Generalmente los elementos pretensados no presentan pretensado centrado en la sección, por lo que, ya en la transferencia empiezan a actuar otras cargas, como el peso propio, que alteran las deformaciones del hormigón. En nuestro caso al transferir se genera una contraflecha, por lo que tras la transferencia las vigas se comportan como vigas biapoyadas. Siempre y cuando estemos fuera de la longitud de desarrollo, la ley de deformaciones instantáneas a la edad de transferencia de la viga en una fibra genérica de la sección será:

$$\varepsilon_c(x, y, j) = -\frac{P(x, j)}{A_c E_c(j)} - \frac{P(x, j)e + M_{pp}(x, j)}{I_c E_c(j)} y = \varepsilon_{c,p}(x, y, j) + \frac{M_{pp}(x, j)}{I_c E_c(j)} y = \varepsilon_{c,p}(x, y, j) + \varepsilon_{c,pp}(x, y, j)$$

donde,

$\varepsilon_c(x, y, j)$	deformación total del hormigón a la edad $t_0$ , en la sección $x$ , en la fibra $y$
$P(x, t)$	fuerza de pretensado en la sección a $x$ metros del apoyo, a la edad $t$
$M_{pp}(x, t)$	momento flector introducido por el peso propio
$t_0$	edad de transferencia
$e$	excentricidad del pretensado



$E_c(j)$	módulo de deformación secante del hormigón a la edad $t_0$
$\varepsilon_{c,p}(x, y, j)$	deformación del hormigón debida al pretensado a la edad de transferencia (positiva a tracción)
$\varepsilon_{c,pp}(x, y, j)$	deformación del hormigón debida al peso propio a la edad de transferencia (positiva a tracción)
$A_c, I_c$	características de la sección neta de hormigón

La cuestión se complica además, dado que las condiciones de apoyo de la viga pueden variar, lo que añade términos de deformación diferida que conducen a un mayor nivel de “ruido” en las medidas.

A una edad genérica,  $t$ , la deformación total del hormigón será:

$$\varepsilon_c(x, y, t) = \varepsilon_{c,p}(x, y, t) + \varepsilon_{c,pp}(x, y, t)$$

Como se ve, aparece una deformación parásita y desconocida debido a la fluencia debida al efecto del peso propio. Suponiendo que esta deformación total de peso propio es homotética de la deformación instantánea debida al peso propio, seguirá una ley cuadrática en  $x$  de coeficientes desconocidos.

$$\varepsilon_c(x, y, t) = \varepsilon_{c,p}(x, y, t) + \sum_{i=1}^n (p_i x^2 + q_i x + r_i)$$

De esta forma, sumando una ley cuadrática la ley supuesta de crecimiento de la fuerza de pretensado, se podrá determinar la longitud de transmisión, la deformación debida a peso propio y carga permanente.

Tabla 10.4.1-1

	Lineal			Exponencial		
	$L_{t1}$	Zona central	$L_{t2}$	$L_{t1}$	Zona central	$L_{t2}$
Ley $\varepsilon_{c,p}(x, y, t)$	$m_1 + n_1 x$	$M$	$m_2 + n_2 x$	$m_1 + a_1 e^{b_1 x}$	$M$	$m_2 + a_2 e^{b_2 x}$
Ley $\varepsilon_p(x, y, t)$	$\sum_{i=1}^n (p_i x^2 + q_i x + r_i)$	$\sum_{i=1}^n (p_i x^2 + q_i x + r_i)$	$\sum_{i=1}^n (p_i x^2 + q_i x + r_i)$	$\sum_{i=1}^n (p_i x^2 + q_i x + r_i)$	$\sum_{i=1}^n (p_i x^2 + q_i x + r_i)$	$\sum_{i=1}^n (p_i x^2 + q_i x + r_i)$

$m_1$  deformación por retracción del extremo 1 de la viga

$M$  deformación total de la viga a la edad considerada en la zona central: comprende la deformación instantánea, retracción, fluencia y, en su caso la deformación derivada de la pérdida de pretensado generalizada a toda la viga en caso de viga fisurada por hendimiento

$m_2$  deformación por retracción del extremo 2 de la viga

Los parámetros se determinarán mediante ajuste de mínimos cuadrados de las medidas manuales de deformaciones, iterando  $L_{t1}$  y  $L_{t2}$  hasta encontrar una ley que cumpla con la condición de que el error cuadrático sea menor que el valor predeterminado. La precisión del ajuste quedará descrito por el coeficiente de regresión.

Hay que señalar que previamente a la aplicación de este algoritmo se realiza una criba de datos erróneos/discordantes, y que la solución inicial propuesta se realiza a la vista de las medidas obtenidas.

El efecto del peso propio no se ha tenido en cuenta a la hora de tratar los datos, debido a que realmente los datos obtenidos son escasos en la zona extrema. En ésta se dispone de un mínimo de tres a un máximo de cinco o seis puntos, tras haber cribado manualmente los que se alejan de la tendencia general. Por esto la eficacia de aproximaciones de orden superior será limitada. Tan sólo se puede estimar con precisión la deformación del peso propio inmediatamente después de la transferencia. Después de la misma la deformación varía debido a los efectos diferidos.

#### 10.4.2. LONGITUD DE TRANSMISIÓN DE LAS VIGAS

En el presente apartado se exponen los resultados de longitudes de transmisión determinadas mediante ajuste lineal y exponencial, sin tener en cuenta el efecto del peso propio.

En la Tabla 10.4.2-1 se refleja la nomenclatura empleada en los siguientes apartados.

Tabla 10.4.2-1

$L_{n1}$	Longitud de transmisión del extremo Sur (mm)
$L_{n2}$	Longitud de transmisión del extremo Norte (mm)
$R^2$	Coefficiente $R^2$ a lo largo de toda la zona instrumentada
ERR.CUAD. =	Error cuadrático cometido, multiplicado por $10^7$

Todas las longitudes de transmisión están proporcionadas en mm.

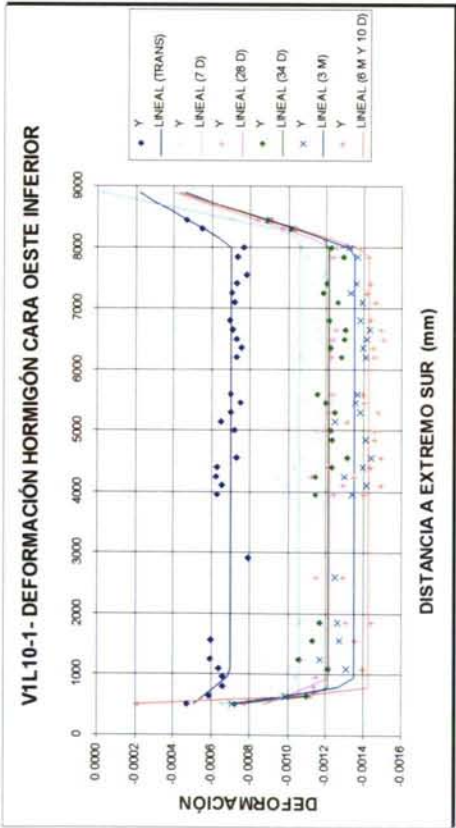
En las Gráficas 10.4.2-1 a 10.4.2-20, y en las Tablas 10.4.2-2 a 10.4.2-9 se presentan los ajustes de las vigas de la primera serie (V1L10-1 a V5L10-1, y la viga contigua a la zona de corte V7L10-1) y de la segunda serie (V2L10-2 y V5C), instrumentadas mediante discos de extensometría.

La precisión de los ajustes lineal y exponencial es limitada en este caso, debido a que existen pocas medidas en los extremos de las vigas. Por ello, no se proporcionan los valores de los coeficientes  $R^2$  en las zonas de transmisión.

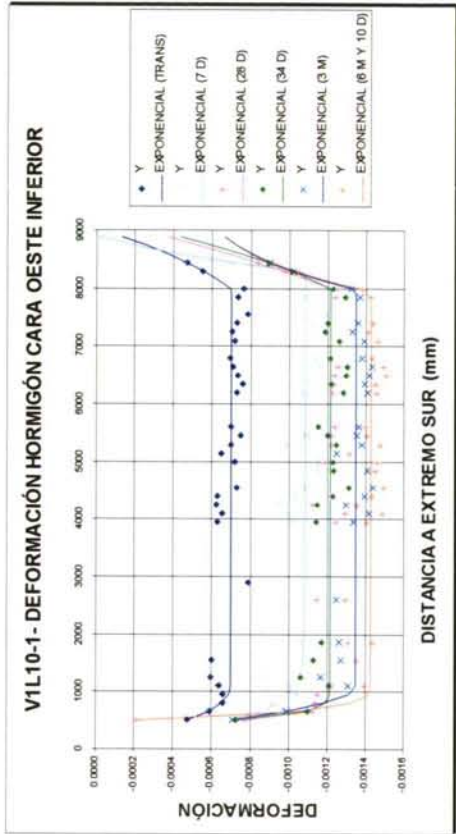
Los valores obtenidos de longitud de transmisión presentan una precisión menor que la obtenida en el Capítulo 8, pero proporcionan un orden de magnitud del alcance de la zona de transmisión y, sobre todo, permiten evaluar si la longitud de transmisión es convergente o divergente, a través de la existencia de una zona central marcada.



Viga V1L10-1



Gráfica 10.4.2-1

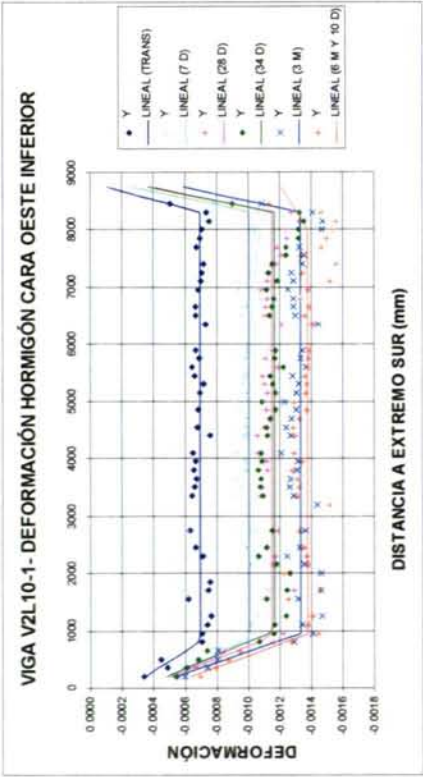


Gráfica 10.4.2-2

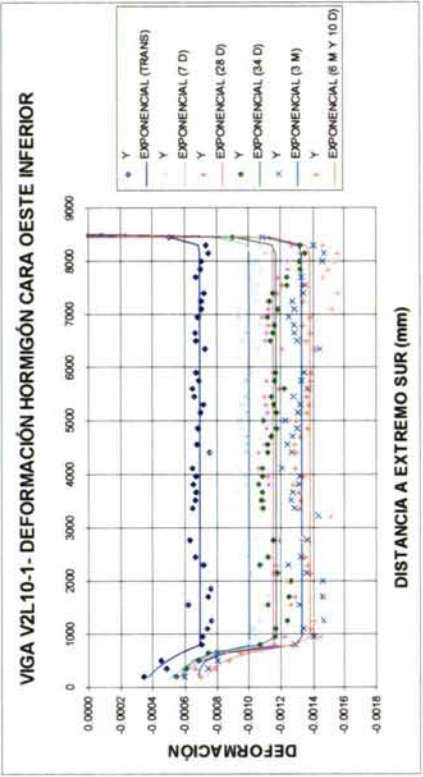
Tabla 10.4.2-1

VIGA V1L10-1	Def transferencia (0 días)		Def 4 días		Def 25 días	
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
Pretensado inferior						
LT1 =	1000	995	5328	647	1001	958
LT2 =	1000	959	699	779	994	946
M =	-0.000697	-0.000698	-0.001081	-0.001060	-0.001217	-0.001221
m <sub>1</sub> =	0.001120	-0.000305	0.001097	0.000789	0.027140	-0.000482
m <sub>2</sub> =	-0.000040	-0.000161	0.000072	0.000127	-0.000252	-0.000309
R <sup>2</sup> =	0.609081925	0.597819	0.906414128		0.813383768	0.753828
ERR CUAD. =	0.766491	0.788575	1.316313	1.573476	0.833400	1.099366
	Def 33 días		Def 89 días		Def 201 días	
L = 8990 mm	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
LT1 =	1000	703	1000	847	999	724
LT2 =	999	881	1000	1027	1029	1047
M =	-0.001217	-0.001217	-0.001350	-0.001351	-0.001429	-0.001429
m <sub>1</sub> =	0.050827	0.000517	0.001540	0.000231	0.046485	0.002580
m <sub>2</sub> =	-0.000308	-0.000335	-0.000630	-0.000362	-0.000629	-0.000334
R <sup>2</sup> =	0.796336062	0.795463	0.870280365	0.870288	0.962036706	0.961732
ERR CUAD. =	0.910448	0.914349	1.113727	1.113660	0.721747	0.727534

Viga V2L10-1



Gráfica 10.4.2-3



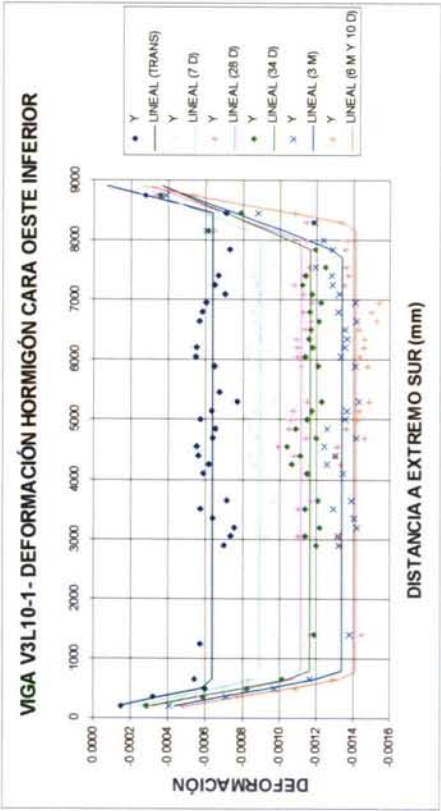
Gráfica 10.4.2-4

Tabla 10.4.2-2

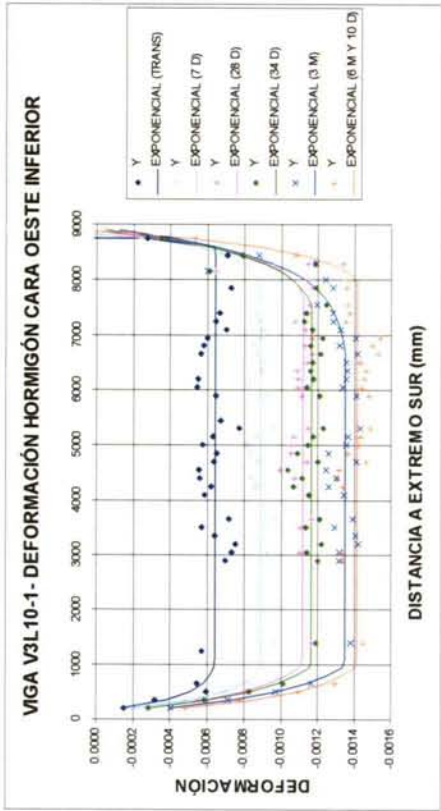
VIGA V2L10-1	Def transferencia (0 días)		Def 4 días		Def 25 días	
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
Pretensado inferior						
LT1 =	803	818	809	869	804	899
LT2 =	838	690	926	672	907	698
M =	-0.000689	-0.000689	-0.001006	-0.001006	-0.001151	-0.001150
m1 =	-0.000318	-0.000233	-0.000457	-0.000320	-0.000549	-0.000309
m2 =	19.765804	0.000229	7.111780	0.000181	10105.377277	-0.000005
R² =	0.797430436	0.795801	0.835348792	0.830024	0.82536881	0.802426
ERR CUAD. =	0.578307	0.582958	1.068050	1.102586	1.843326	2.085501
L = 9000 mm	Def 33 días		Def 65 días		Def 201 días	
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
LT1 =	834	1002	813	950	842	953
LT2 =	942	698	968	698	965	962
M =	-0.001166	-0.001166	-0.001330	-0.001329	-0.001380	-0.001377
m1 =	-0.000562	-0.000302	-0.000673	-0.000318	-0.000702	-0.000427
m2 =	2.626895	0.000078	1.464642	-0.000181	1.825057	-0.001156
R² =	0.817512789	0.802213	0.856877006	0.828798	0.807951116	0.763470
ERR CUAD. =	2.350713	2.547781	2.241189	2.680875	2.813377	3.464989



Viga V3L10-1



Gráfica 10.4.2-5

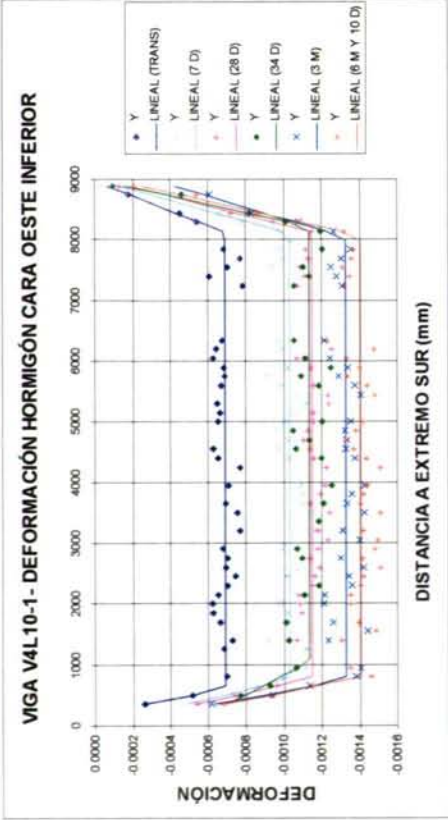


Gráfica 10.4.2-6

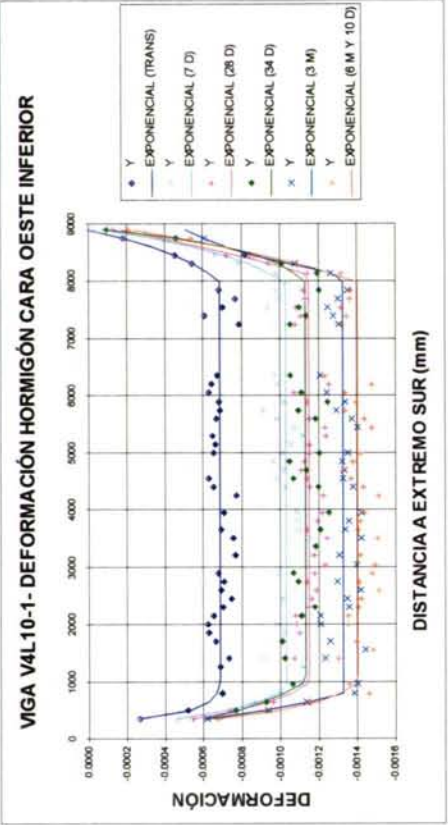
Tabla 10.4.2-3

VIGA V3L10-2		Def transferencia (0 días)		Def 4 días		Def 25 días	
Pretensado inferior		Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
LT1 =		1000	541	939	669	995	676
LT2 =		1000	519	1448	928	1204	1012
M =		-0.000641	-0.000638	-0.000891	-0.000894	-0.001111	-0.001114
m <sub>1</sub> =		0.000558	0.000171	0.000625	0.00036	0.000335	0.000054
m <sub>2</sub> =		0.686498	0.000066	0.000876	-0.000156	0.000428	-0.000223
R <sup>2</sup> =		0.75628728	0.760164	0.868608559	0.830884	0.862400621	0.844529
ERR CUAD. =		1.369656	1.347868	1.418414	1.825660	2.422010	2.736586
Def 33 días		Def 69 días		Def 201 días			
L = 9000 mm		Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
LT1 =		984	727	986	740	1000	701
LT2 =		1448	1150	2349	1223	1000	739
M =		-0.001164	-0.001165	-0.001354	-0.001343	-0.001413	-0.001411
m <sub>1</sub> =		0.000449	0.000014	0.000298	-0.000095	0.000398	-0.000128
m <sub>2</sub> =		0.000237	-0.000291	0.000122	-0.000279	0.000670	-0.000085
R <sup>2</sup> =		0.853210884	0.838718	0.864754025	0.849747	0.937415956	0.943275
ERR CUAD. =		2.999890	3.296077	3.653548	4.058963	1.275748	1.156307

Viga V4L10-1



Gráfica 10.4.2-7



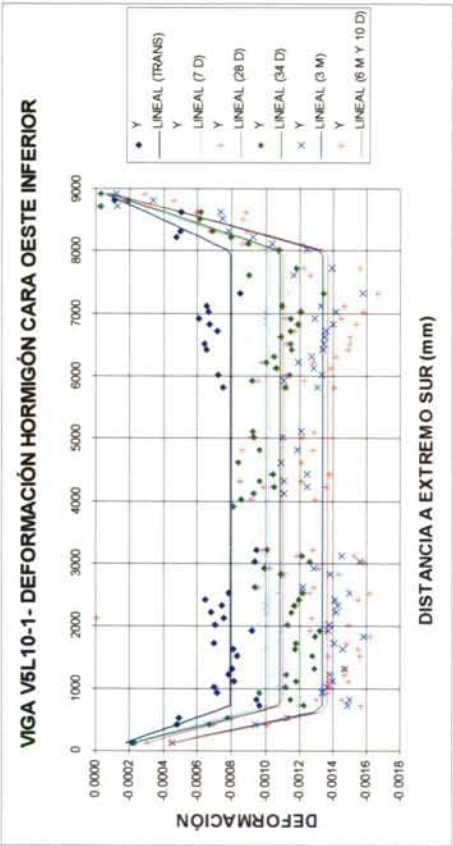
Gráfica 10.4.2-8

Tabla 10.4.2-4

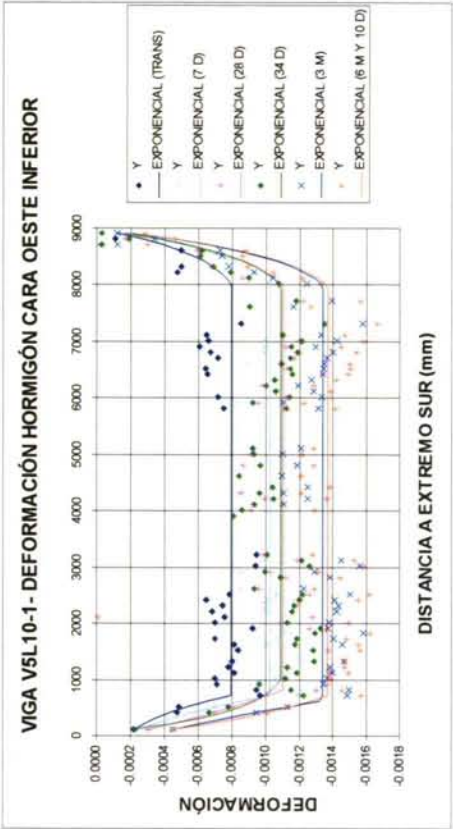
VIGA V4L10-1	Def transferencia (0 días)		Def 4 días		Def 25 días	
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
Pretensado inferior						
LT1 =	1000	606	883	764	987	783
LT2 =	1000	863	1020	887	878	861
M =	-0.000688	-0.000687	-0.001034	-0.001033	-0.001151	-0.001150
m <sub>1</sub> =	0.003290	0.003223	0.000754	-0.000018	0.000533	-0.000038
m <sub>2</sub> =	0.000163	0.000023	0.000148	0.000000	-0.000015	-0.000055
R <sup>2</sup> =	0.869948365	0.870438	0.923590705	0.917687	0.942690658	0.943145
ERR.CUAD. =	0.725028	0.722296	1.441760	1.553151	1.212889	1.203271
L = 9000 mm	Def 33 días		Def 89 días		Def 201 días	
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
LT1 =	1000	1039	785	752	1000	802
LT2 =	1000	771	886	952	1000	919
M =	-0.001133	-0.001134	-0.001332	-0.001332	-0.001407	-0.001405
m <sub>1</sub> =	-0.000011	-0.000477	0.000373	-0.000025	0.001225	-0.000119
m <sub>2</sub> =	0.000244	-0.000007	-0.000457	-0.000307	-0.000039	-0.000110
R <sup>2</sup> =	0.921214279	0.922694	0.901520039	0.896932	0.938955327	0.946456
ERR.CUAD. =	1.334132	1.309081	1.461722	1.529817	1.888963	1.656863



Viga V5L10-1



Gráfica 10.4.2-9

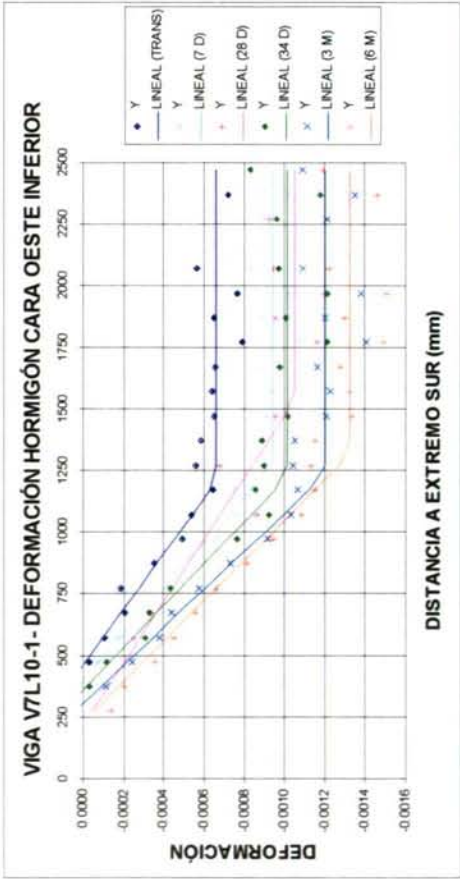


Gráfica 10.4.2-10

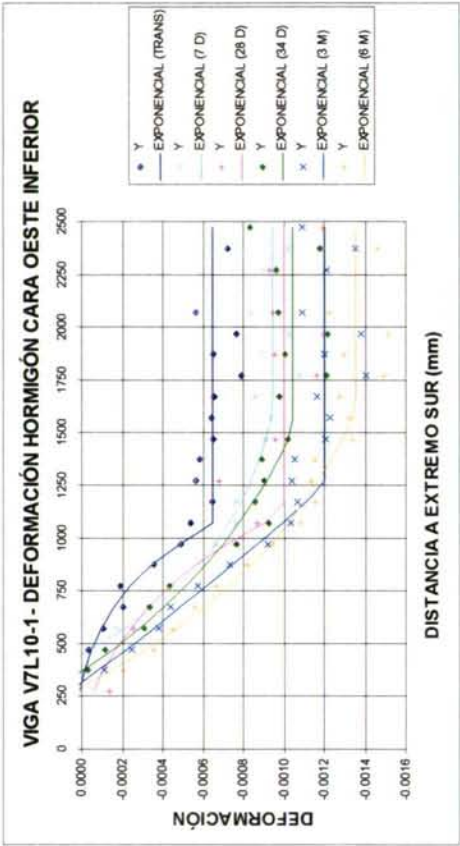
Tabla 10.4.2-5

VIGA V5L10-1	Def transferencia (0 días)		Def 4 días		Def 25 días	
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
Pretensado inferior						
LT1 =	725	725	725	725	823	760
LT2 =	1000	1000	1000	1000	1000	1000
M =	-0.000794	-0.000791	-0.001024	-0.001022	-0.001100	-0.001100
m <sub>1</sub> =	-0.000165	-0.000048	-0.000141	-0.000038	-0.000116	-0.000144
m <sub>2</sub> =	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
R <sup>2</sup> =	0.705302466	0.693364	0.69201933	0.687212	0.544810696	0.544741
ERR.CUAD. =	1.937989	2.016499	3.666224	3.723453	6.835700	6.836754
	Def 33 días		Def 89 días		Def 201 días	
L = 8996 mm						
LT1 =	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
LT2 =	1000	725	635	658	725	651
M =	-0.001086	-0.001085	-0.001339	-0.001339	-0.001365	-0.001365
m <sub>1</sub> =	0.000191	-0.000044	-0.000270	-0.000238	-0.000139	-0.000232
m <sub>2</sub> =	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
R <sup>2</sup> =	0.538285716	0.571663	0.596433613	0.596337	0.287021445	0.286622
ERR.CUAD. =	7.572697	7.025261	6.255567	6.257057	24.093177	24.106667

Viga V7L10-1



Gráfica 10.4.2-11



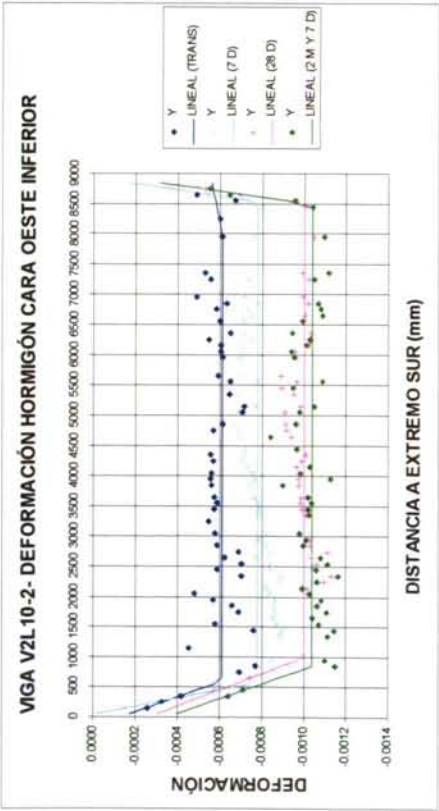
Gráfica 10.4.2-12

Tabla 10.4.2-6

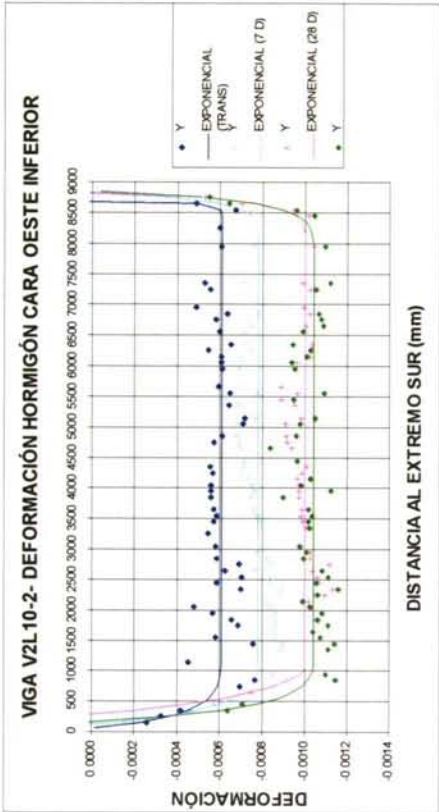
VIGA V7L10-1		Def transferencia (0 días)		Def 5 días		Def 26 días	
Pretensado inferior		Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
LT1 =		1057	1201	1590	1272	1119	1537
M =		-0.000648	-0.000659	-0.000947	-0.000942	-0.001001	-0.001053
m1 =		0.000054	0.000416	0.001344	0.000433	0.000041	0.000173
R² =		0.916735436	0.925274	0.949940121	0.944812	0.90486411	0.916131
ERR.CUAD. =		0.760227	0.682269	0.588995	0.649330	2.359986	2.080499
		Def 34 días		Def 90 días		Def 202 días	
		Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
LT1 =		1516	1225	1253	1232	1602	1317
M =		-0.001046	-0.001016	-0.001205	-0.001205	-0.001353	-0.001329
m1 =		0.000703	0.000429	0.000465	0.000400	0.000703	0.000281
R² =		0.940532428	0.935464	0.953860173	0.953599	0.966883987	0.953647
ERR.CUAD. =		1.878321	2.038408	1.832576	1.842969	1.371579	1.919815



Viga V2L10-2



Gráfica 10.4.2-13



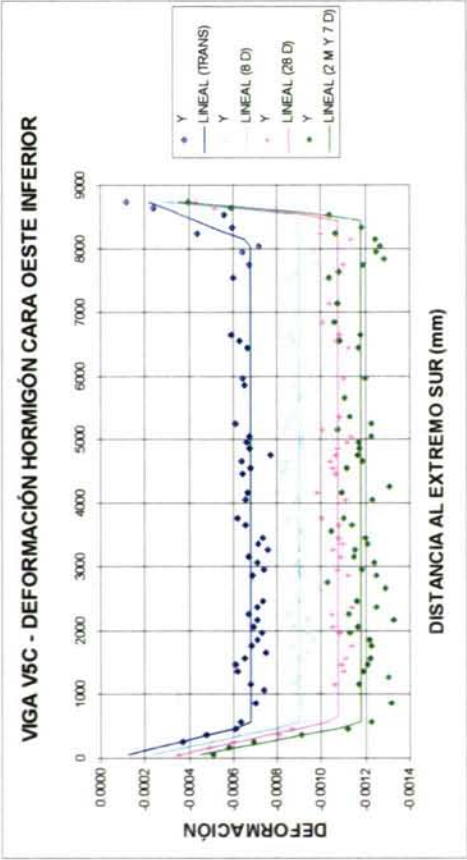
Gráfica 10.4.2-14

Tabla 10.4.2-7

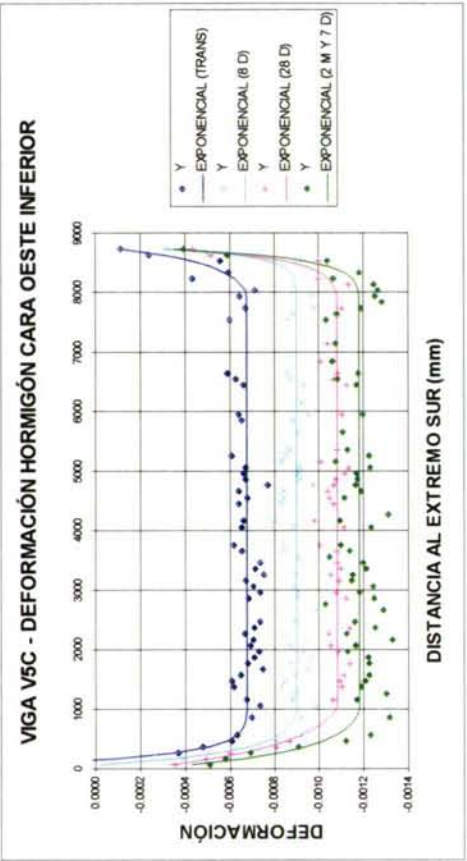
VIGA V2L10-2	Def transferencia (0 días)		Def 7 días	
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
Pretensado inferior				
LT1 =	1010	593		582
LT2 =	1000	995		470
M =	-0.000608	-0.000607	-0.000777	-0.000777
m <sub>1</sub> =	0.000143	-0.000132	0.000479	0.000061
m <sub>2</sub> =	3.853165	-0.000551	0.003138	0.000119
R <sup>2</sup> =	0.498954292	0.497419	0.74823308	0.768958
ERR CUAD. =	2.231392	2.238231	2.916988	2.676864
	Def 28 días		Def 67 días	
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
LT1 =	1000	1000	1000	852
LT2 =	1000	482	1000	508
M =	-0.001000	-0.001000	-0.001038	-0.001037
m <sub>1</sub> =	0.001433	-0.000261	0.001136	-0.000350
m <sub>2</sub> =	0.002581	0.000008	0.001619	-0.000009
R <sup>2</sup> =	0.69950314	0.722195	0.688934942	0.723643
ERR CUAD. =	1.484484	1.372383	2.569677	2.282958

Viga V5C

Pretensado Inferior



Gráfica 10.4.2-15



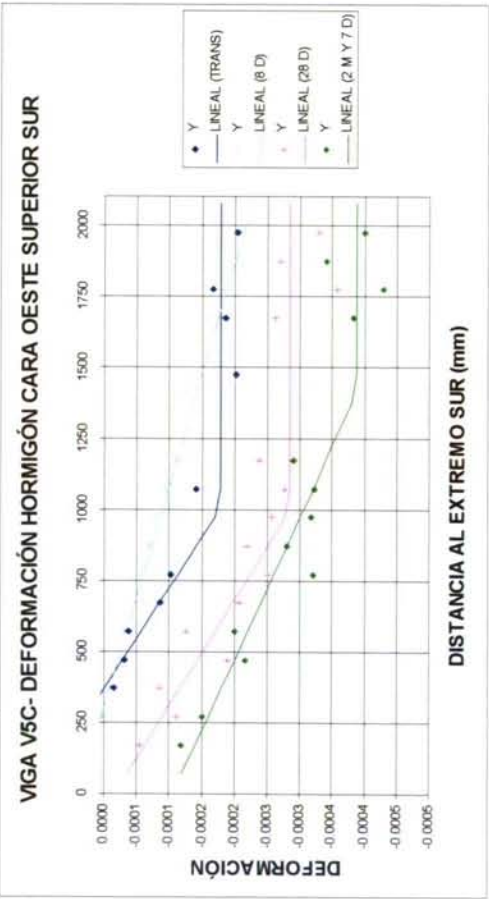
Gráfica 10.4.2-16

Tabla 10.4.2-8

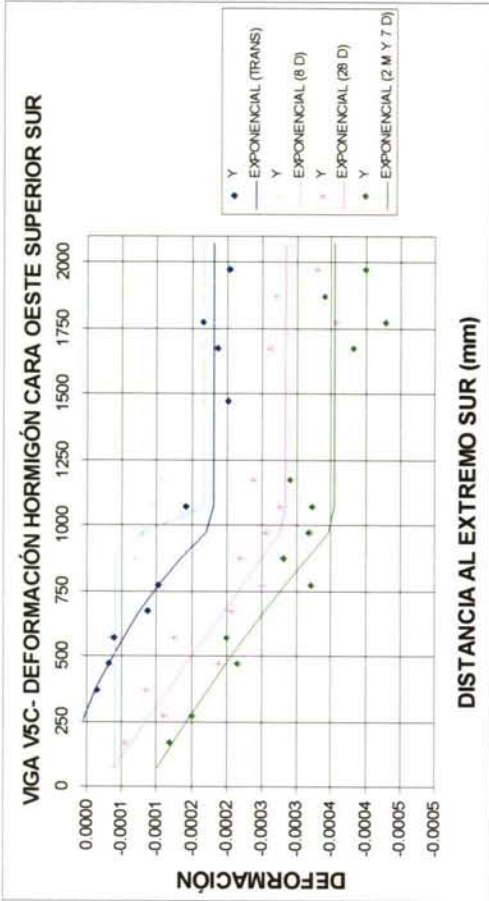
VIGA V5C	Def transferencia (0 días)		Def 5 días		Def 28 días		Def 67 días	
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
Pretensado inferior								
LT1 =	1000	526	1000	543	1000	604	1000	537
LT2 =	1000	895	1000	466	1000	509	1000	515
M =	-0.000675	-0.000676	-0.000898	-0.000897	-0.001078	-0.001076	-0.001183	-0.001179
m <sub>1</sub> =	0.001004	-0.000047	0.000294	-0.000142	-0.000186	-0.000265	-0.000223	-0.000349
m <sub>2</sub> =	0.000852	-0.000029	0.003672	0.000465	0.001714	0.000359	0.002629	0.000475
R <sup>2</sup> =	0.802694482	0.769246	0.837830293	0.883334	0.931992691	0.945908	0.812105426	0.848130
ERR.CUAD =	1.438865	1.682791	1.599580	1.150750	1.179947	0.938510	4.134518	3.341808



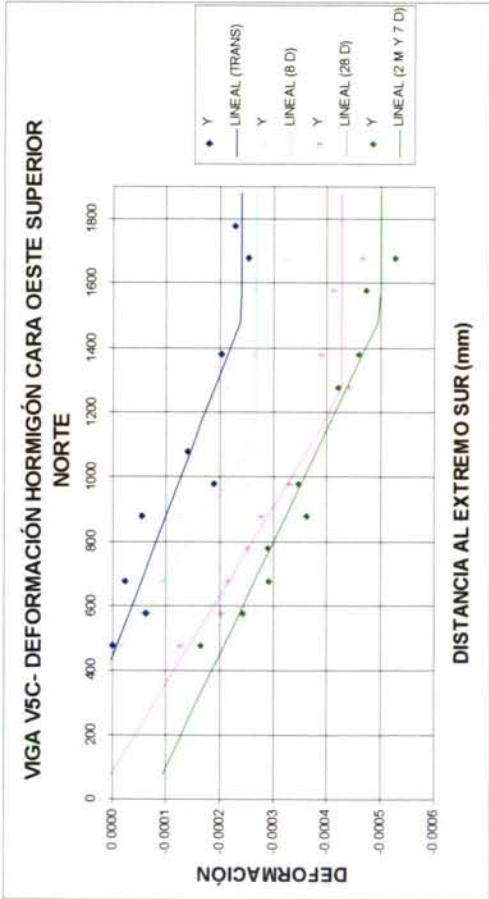
Pretensado Superior



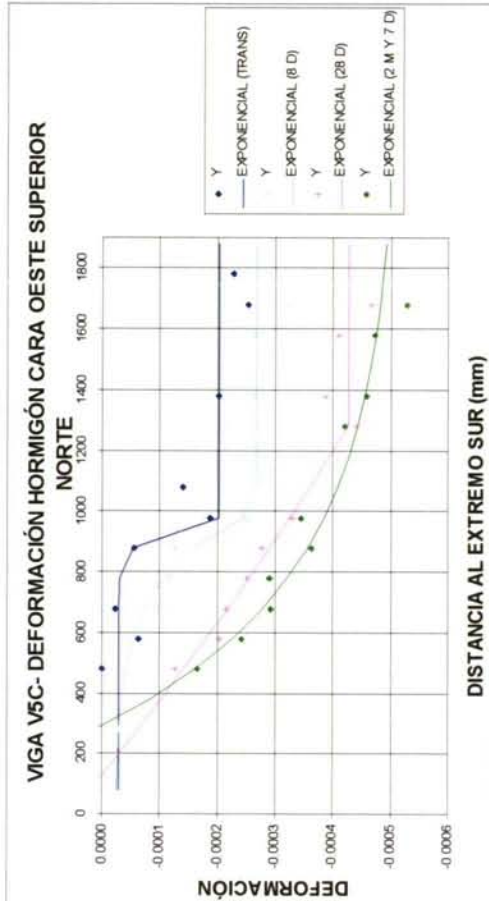
Gráfica 10.4.2-17



Gráfica 10.4.2-18



Gráfica 10.4.2-19



Gráfica 10.4.2-20

Tabla 10.4.2-9

VIGA VSC	Def transferencia (0 días)		Def 5 días		Def 28 días		Def 68 días	
	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Exponencial	Lineal
Cordón superior Norte								
LT1 =	948	1495	1000	1125	1279	1257	1885	1501
M =	-0.000203	-0.000240	-0.000267	-0.000268	-0.000426	-0.000426	-0.000493	-0.000501
m <sub>1</sub> =	-0.000029	0.000101	-0.000024	0.000172	0.000054	0.000032	0.000403	-0.000071
R <sup>2</sup> =	0.872603793	0.877758	0.908605835	0.891915	0.960846134	0.960634	0.951345569	0.947332
ERR.CUAD. =	0.091335	0.087640	0.086440	0.102226	0.045679	0.045927	0.056422	0.061077
	Def transferencia (0 días)		Def 5 días		Def 28 días		Def 68 días	
Cordón superior Sur								
LT1 =	1000	1000	1000	2172	1000	1000	1000	1416
M =	-0.000180	-0.000177	-0.000168	-0.000239	-0.000283	-0.000283	-0.000355	-0.000389
m <sub>1</sub> =	0.000038	0.000103	-0.000041	0.000038	-0.000018	-0.000017	-0.000086	-0.000105
R <sup>2</sup> =	0.935959212	0.927189	0.665342954	0.984804	0.831063722	0.831049	0.831810029	0.891970
ERR.CUAD. =	0.030270	0.034415	0.200131	0.009088	0.182294	0.182309	0.181238	0.116411



### 10.4.3. RESUMEN DE LAS LONGITUDES DE TRANSMISIÓN OBTENIDAS

A partir de los resultados obtenidos, resumidos en la Tabla 10.4.3-1, se concluye que:

- La longitud de transmisión aparente de las vigas de HL10-1, excepto de la contigua a la zona de corte, se puede acotar entre 500 y 1050 mm. No hay que olvidar que la distancia necesaria para alcanzar la fuerza de pretensado máxima puede estar afectada por pérdidas derivadas de la adherencia deficiente, consecuencia de la fisuración por hendimiento. Las medidas analizadas comprenden los seis primeros meses después de la transferencia.
- La longitud de transmisión de la viga V7L0-1, contigua a la zona de corte, está comprendida entre 1200 mm y 1600 mm, considerando medidas tomadas durante los primeros seis meses tras la transferencia. Se puede apreciar que esta distancia es considerablemente superior a la del resto de las vigas. Esto es debido a que esta viga es contigua a la zona de corte, por lo que el impacto tras la transferencia fue máximo.
- La aproximación exponencial proporciona resultados poco verosímiles en las vigas V1L10-1, V2L10-1, V5L10-1 zona Sur. Sin embargo proporcionan resultados coherentes en vigas V3L10-1, V4L10-1, V5L10-1 zona Norte y V7L10-1 a edades posteriores a la de transferencia. En general proporciona valores buenos para la zona de la viga cercana a la de corte, es decir, la más dañada.
- Los valores globales de los coeficientes  $R^2$  obtenidos son similares para ambas aproximaciones, en general.
- La longitud de transmisión de la viga V2L10-2 está comprendida entre 470 y 1010 mm, considerando las medidas tomadas durante los primeros dos meses tras la transferencia.
- La longitud de transmisión de la viga V5C está comprendida entre 466 y 1000 mm, considerando las medidas tomadas durante los primeros dos meses tras la transferencia. En este material la aproximación que proporciona un valor más elevado del coeficiente global  $R^2$  el ajuste lineal.
- En posteriores investigaciones sería conveniente instrumentar exhaustivamente la zona cercana a apoyos, donde se produce el máximo gradiente de la fuerza de pretensado. Cuando, como en este caso, sea previsible la fisuración por hendimiento es conveniente instrumentar la viga a lo largo de toda su longitud.
- La longitud de transmisión del pretensado superior de la viga V5C es aparentemente superior a la longitud de transmisión del pretensado inferior. Esto puede venir motivado por la deformación provocada por el peso propio, que en esta fibra es de compresión, cuadrática en  $x$ , lo que puede motivar que el máximo de las medidas se traslade hacia el interior de la viga (véanse Figuras 10.4.3-1 y 10.4.3-2).

Tabla 10.4.3-1: Longitudes de transmisión de las vigas (mm)

		AJUSTE /PRETENSADO	Trans.	1 semana	1 mes	2 meses	3 meses	6 meses	AJUSTE /PRETENSADO	Trans.	1 semana	1 mes	2 meses	3 meses	6 meses
V1L10-1	Oeste	Lin. Inferior	A.A	995	647	703	847	724	Exp. Inferior	1000	5328	1000			999
	Oeste	Lin. Inferior	A.P.	959	749	881	1027	1047	Exp. Inferior	1000	699	999			1029
V2L10-1	Oeste	Lin. Inferior	A.A	818	869	1002	950	953	Exp. Inferior	803	809	834			842
	Oeste	Lin. Inferior	A.P.	690	672	689	698	962	Exp. Inferior	838	926	942			965
V3L10-1	Oeste	Lin. Inferior	A.A	541	669	727	740	701	Exp. Inferior	1000	939	984			1000
	Oeste	Lin. Inferior	A.P.	519	928	1150	1223	739	Exp. Inferior	1000	1448	1448			1000
V4L10-1	Oeste	Lin. Inferior	A.A	606	764	1039	752	802	Exp. Inferior	1000	883	1000			1000
	Oeste	Lin. Inferior	A.P.	863	887	771	952	919	Exp. Inferior	1000	1020	1000			1000
V5L10-1	Oeste	Lin. Inferior	A.A	725	725	725	658	651	Exp. Inferior	725	725	1000			725
	Oeste	Lin. Inferior	A.P.	1000	1000	1000	1000	1000	Exp. Inferior	1000	1000	1000			1000
V7L10-1	Oeste	Lin. Inferior	A.A	1201	1272	1225	1232	1317	Exp. Inferior	1057	1590	1516			1602
V2L10-2	Oeste	Lin. Inferior	A.A	593	582	1000			Exp. Inferior	1010	1000	1000	1000		
	Oeste	Lin. Inferior	A.P.	995	470	482	508		Exp. Inferior	1000	1000	1000	1000		
V5C	Oeste	Lin. Inferior	A.A	526	543	604	537		Exp. Inferior	1000	1000	1000	1000		
	Oeste	Lin. Inferior	A.P.	895	466	509	515		Exp. Inferior	1000	1000	1000	1000		
V5C	Oeste	Lin. Superior	A.A	1495	1125	1257	1416		Exp. Superior	948	1000	1279	1885		



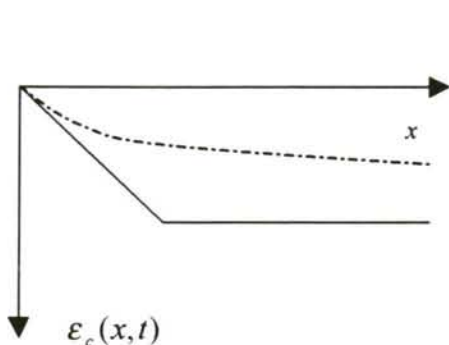


Figura 10.4.3-1: Pretensado superior; las deformaciones del pretensado y del peso propio son de compresión

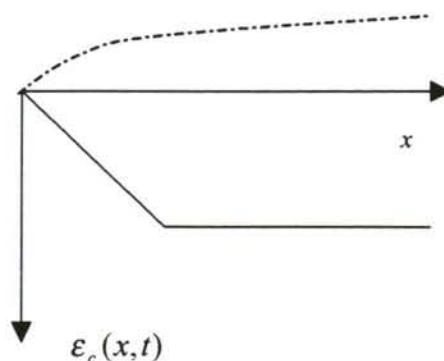


Figura 10.4.3-2: Pretensado inferior; las deformaciones del peso propio son de tracción, y las del pretensado de compresión

- Como comentario final, el hormigón ligero ha demostrado tener una buena capacidad adherente, que paradójicamente es la causa de la fisuración diferida por hendidamiento. Esta adherencia excelente provoca que la fuerza de pretensado se transfiera inicialmente en una corta longitud, de valor muy similar a la longitud de transmisión del HC. Las tensiones de tracción que se generan son muy elevadas para la capacidad resistente a tracción de este tipo de hormigón, lo que desencadena la fisuración. La baja capacidad resistente de los áridos ligeros es a nuestro juicio la causa de la propagación de fisuras a lo largo de toda la viga.

## 10.5. PLANTEAMIENTO DE LOS ENSAYOS A FLEXIÓN DE LAS VIGAS

### 10.5.1. CRITERIOS DE ROTURA ADOPTADOS POR LOS DIFERENTES AUTORES

En la bibliografía se distingue entre cuatro tipos básicos de rotura en vigas:

- Rotura por flexión en las vigas, bien por agotamiento del hormigón a compresión, o por deformación excesiva de la armadura traccionada.
- Rotura por fallo del anclaje, caracterizada por el deslizamiento de los cordones de pretensado antes de que la viga alcance su capacidad nominal.
- Rotura por cortante, caracterizada por la aparición de fisuras inclinadas en las zonas de apoyos/aplicación de la carga concentrada.
- Rotura por torsión.

Como se vio en el Capítulo 9, las vigas fabricadas están dimensionadas para presentar en la zona central, durante el ensayo de carga puntual simétrica, agotamiento en la zona central a flexión de tipo dúctil (es decir, habiendo plastificado previamente el pretensado inferior).

Si la carga aplicada está convenientemente centrada en la sección transversal, no son previsibles esfuerzos de torsión sobre la sección, por lo que no es de prever este tipo de rotura. Para prevenir esfuerzos torsores se realiza un centrado cuidadoso de los elementos de aplicación/reparto de cargas respecto a la sección transversal.

Dependiendo de la distancia de los extremos a la zona de aplicación de la carga, podrán producirse los siguientes tipos de rotura en la zona central de las vigas fabricadas:

- Rotura a flexión dúctil. Esta es la forma de rotura prevista en la zona central: se produce la rotura por agotamiento a compresión del hormigón, habiendo plastificado previamente el pretensado traccionado en la sección transversal considerada. Si se produce este tipo de rotura, dispondremos de una cota superior de la longitud de anclaje, que viene dada por la distancia desde el punto de aplicación de la carga al extremo más cercano. La rotura dúctil irá acompañada de grandes deformaciones de la viga.
- Rotura por fallo del anclaje de los cordones de pretensado. Este tipo de rotura se caracteriza por el deslizamiento generalizado de los cordones antes de que se alcance la capacidad nominal de la viga. Esto conduce a un agotamiento prematuro de la viga, bien por flexión o por cortante, para un momento flector menor que el nominal. Si se produce este tipo de rotura, dispondremos de una cota inferior de la longitud de anclaje, que vendrá dada por la distancia desde el punto de aplicación de la carga al extremo más cercano.
- Rotura por flexión-adherencia, cuando se produce la rotura por agotamiento a compresión del hormigón, habiendo plastificado previamente el pretensado, y habiendo detectado previamente deslizamiento del pretensado. Se alcanza la capacidad nominal de la viga a flexión. Este tipo de rotura se produce cuando el punto de aplicación de la carga se encuentra próximo a la longitud de anclaje.
- Rotura a flexión-cortante, en la zona inmediatamente contigua a la aplicación de las cargas puntuales, puesto que en esta zona se producen momentos cercanos al valor máximo, acompañados de los esfuerzos cortantes máximos.

A la hora de hablar de deslizamientos, hay que diferenciar:

- El deslizamiento del pretensado en la sección de la zona central considerada. Puede tratarse de un deslizamiento localizado, debido a la pérdida de adherencia motivada por la fisuración local. Realmente, este deslizamiento supone una redistribución de la tensión del pretensado longitudinalmente, pero no implica fallo del anclaje.
- El deslizamiento generalizado del pretensado, que afecta al extremo más cercano. En este caso, este deslizamiento puede conducir a un agotamiento prematuro o, si se produce la suficiente adherencia mecánica en la zona de transmisión<sup>10.1</sup>, se puede alcanzar o superar la capacidad resistente que presentaría la viga en ausencia de deslizamiento.

El diagnóstico sobre el tipo de rotura depende de la precisión en la detección de deslizamientos del pretensado.

<sup>10.1</sup> En los ensayos de pórtico LT se vio que para valores de deslizamiento elevados, de varios mm, se alcanzaba una F.U.A. (y, por lo tanto, una capacidad adherente) incluso superior a la F.U.A. previa al deslizamiento generalizado a lo largo de la probeta, debido a la adherencia mecánica.



A la hora de evaluar el deslizamiento en los extremos de la viga, la mayor parte de los investigadores emplean transductores o relojes comparadores de 0.001 mm de precisión (CHON91, WEER91, COUS86,...). Sin embargo, la normativa UNE 7-436-82 y el procedimiento de ensayo de adherencia de aceros para armaduras de hormigón armado (EH91) establecen una precisión para los transductores empleados de 0.01 mm.

A la hora de dilucidar si la forma de rotura de la viga es de un tipo u otro, en el caso de ensayos de vigas pretensadas de armadura pretesa, disponemos de la siguiente información experimental acerca del ensayo:

- Estimación de los valores de deformación (pero no de tensión) del cordón de pretensado durante el ensayo, en determinadas secciones, a través de las bandas extensométricas adheridas a un alambre del cordón durante la fabricación de las vigas. Estas medidas permiten detectar deslizamientos locales de pretensado.
- Reacciones en los apoyos, a través de las células de carga.
- Valores de deformación de la superficie de hormigón, a la altura del pretensado superior o inferior, mediante lecturas de las bandas extensométricas y/o extensómetro mecánico.
- Medida de los deslizamientos relativos del cordón de pretensado respecto a las caras dorsales y frontales de la viga (Norte y Sur), mediante transductores potenciométricos resistivos, de 0.01 mm de precisión<sup>10.2</sup>.
- Medida de la flecha de la viga en centro luz, mediante un transductor de desplazamiento potenciométrico.

Por otra parte, mediante cálculo disponemos del momento último previsible para el ensayo, momento nominal, suponiendo que los cordones están correctamente anclados.

Es importante destacar que no se dispone de información directa de la tensión en los cordones de pretensado, puesto que a la edad de ensayo se habrá producido una relajación considerable. Es decir, aunque la deformación registrada fuese constante a lo largo del tiempo, debido al proceso de relajación se producirían descensos en la tensión del cordón. El conocimiento del valor exacto de estas pérdidas es prácticamente imposible, puesto que la relajación se produce en un ambiente de humedad y temperatura desconocidos. De todas formas, se puede establecer un margen bastante aproximado para estas pérdidas y, por lo tanto, para la tensión de los cordones de pretensado antes de empezar el ensayo.

El control del ensayo por deformaciones es la forma más eficaz de determinar el tipo de rotura, puesto que permite detectar las ramas post-pico de los diagramas momento-flecha o momento-curvatura. El equipo hidráulico de que disponemos no tiene capacidad para realizar el ensayo por control de deformaciones. Por ello el control del ensayo se ha efectuado por carga, lo que dificulta el diagnóstico de los tipos de rotura. La velocidad de aplicación de la carga se ha fijado en 0.8 kN/s.

---

<sup>10.2</sup> Los transductores empleados han presentado una precisión superior en el sistema de adquisición de datos empleado en estos ensayos, que en el sistema Desin, empleado en los ensayos de los Capítulos 6 y 8.



## 10.5.2. CRITERIOS DE ROTURA ADOPTADOS EN EL PRESENTE TRABAJO

### 10.5.2.1. Medidas analizadas para determinar el tipo de rotura

Se analizarán los siguientes aspectos:

1. Se determina el momento último teórico en la hipótesis de que la deformación última del hormigón en la fibra más comprimida está comprendida entre 0.0035 y 0.003, valores  $M_{u,0.0035}$  y  $M_{u,0.003}$ , respectivamente. Desconocemos el valor exacto de la deformación máxima del HL en rotura. En el Capítulo 4 vimos que 0.003 es una cota inferior. Suponemos que 0.0035 es una cota superior.
2. Previamente al análisis habremos estimado, a través de los valores de deformaciones del pretensado de la misma viga o de otra similar, la fuerza de pretensado en la zona central,  $P(x,t)$ , teniendo en cuenta la pérdida de tensión por relajación. Con este valor podremos estimar la variación de deformación necesaria en la zona central para que la deformación total sea igual o superior a la de plastificación, que denominaremos  $\Delta\epsilon_{p,nec}^*$ . Consideraremos que se ha detectado plastificación del pretensado de la zona central si la variación de deformación medida máxima en esa zona,  $\Delta\epsilon_{p,m\acute{a}x}^*$ , cumple:

$$\Delta\epsilon_{p,m\acute{a}x}^* \geq \Delta\epsilon_{p,nec}^*$$

3. Diagrama momento-flecha: mientras la sección no haya fisurado, la flecha ha de ser lineal con la carga aplicada. El valor del momento flector a partir del cual el diagrama deje de ser lineal será el momento de fisuración aparente de la viga. Se analizará la pendiente del tramo final del diagrama momento-flecha para evaluar la posible plastificación del pretensado: cuando haya plastificado la pendiente tenderá a ser horizontal, lo que implica aumento de flecha a carga constante. A carga elevada se ha constatado que en los escalones de carga constante la flecha de la viga no se estabiliza. Esto se analizará en cada una de las vigas.
4. Variación de deformación de las galgas de pretensado a lo largo de la viga, a carga creciente, hasta la rotura/carga máxima y en descarga. Esta gráfica da una idea del comportamiento en las diferentes partes de la viga: posible asimetría en aplicación de la carga en las partes Norte y Sur de la viga, diferenciación de longitud de transmisión respecto a la longitud de adherencia a flexión. ¿Aumenta la deformación de las galgas de pretensado de la zona de transmisión?
5. Diagrama del la {variación de deformación} respecto al {momento flector en la zona central de la viga a lo largo del ensayo} para todas las galgas extensométricas. Análisis de la pendiente final. Análisis de la variación de deformación de las galgas próximas a los extremos de la viga, a fin de detectar deslizamientos locales. El deslizamiento local estará caracterizado por pérdida de deformación durante el ensayo a carga creciente (véase Figura 10.5.2.1-1). Se analizará la pendiente de esta curva, que tenderá a aumentar indefinidamente cuando el pretensado plastifique: el pretensado sigue deformándose aunque la carga permanezca constante.



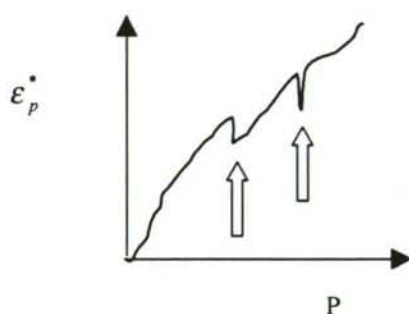


Figura 10.5.2.1-1

6. Análisis del diagrama del {momento de sollicitación} respecto a la {curvatura de las secciones centrales,  $\chi$ } instrumentadas con tres bandas extensométricas (véase la Figura 10.5.2.1-2). Determinación del momento de fisuración de la sección, valor a partir del cual se pierde la linealidad del diagrama momento-curvatura. Comprobación de la linealidad de las deformaciones de estas secciones a través del coeficiente  $R$  de la recta de regresión aplicada a las deformaciones a lo largo del ensayo. Determinación de la planeidad de las secciones cercanas a la aplicación de las cargas, a través del coeficiente  $R$ . Comparación con el diagrama momento-curvatura teórico. Evaluación de la curvatura final y de la pendiente final del diagrama momento-curvatura. La pendiente final tenderá a ser nula cuando el pretensado esté plastificado.

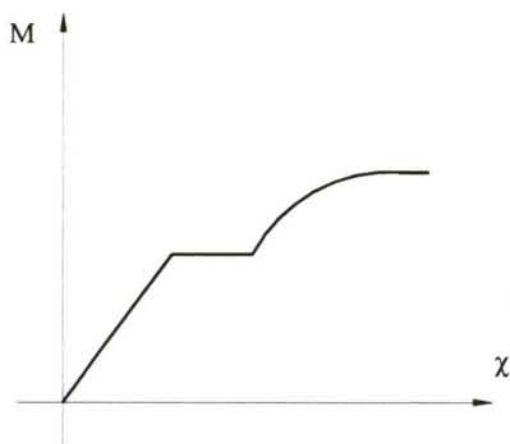


Figura 10.5.2.1-2

7. Valores de deslizamiento de los cordones-momento flector en los extremos, a través de la medida de los transductores de desplazamiento colocados en ambos extremos de la viga. Esto permite evaluar si se ha producido deslizamiento generalizado a toda la viga.

En las tres últimas vigas ensayadas V7C, V1L10-2 y V7L10-1, se colocaron, junto con los transductores de desplazamiento, tres relojes comparadores (dos de 0.01 mm de precisión y uno de 0.001 mm de precisión) para disponer de una medida redundante de los deslizamientos finales, y así poder comprobar la sensibilidad de los transductores de desplazamiento.

8. En la mayor parte de las vigas ensayadas, ante la inestabilidad de las medidas de los transductores de desplazamiento, se decidió instrumentar ambas caras laterales de la viga a la altura de la primera y última galga extensométrica del pretensado. Estas zonas se encuentran fuera de los apoyos de la viga, situados a 60 cm de cada extremo de la viga. En esta zona, de “calma” tensional, las variaciones de deformación del pretensado y de la superficie de hormigón sólo pueden ser debidas a deslizamientos del pretensado.
9. Comparación de las deformaciones de la superficie del hormigón y de las galgas extensométricas de los cordones que quedan a la misma altura, en los extremos de la viga. A través de estas curvas se puede determinar si el cordón de pretensado ha deslizado o no en esa sección.

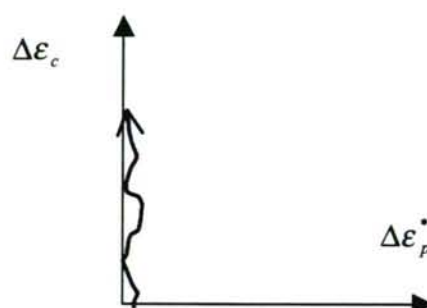


Figura 10.5.2.1-3

En la Figura 10.5.2.1-3 se aprecia el aumento de la deformación del hormigón, sin que deslice el cordón instrumentado: este se tracciona, es decir, está menos comprimido, debido a la pérdida de fuerza de pretensado. Esto sucede cuando desliza otro u otros cordones de pretensado. En todo caso, el que está instrumentado no desliza, por lo que el deslizamiento no es generalizado.

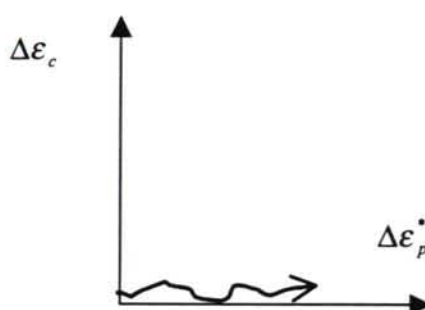


Figura 10.5.2.1-4

En la Figura 10.5.2.1-4 se aprecia la variación de la deformación del pretensado, acompañada, en su caso, de deformación del hormigón en sentido de traccionarse. Esto implica deslizamiento del cordón instrumentado como mínimo. Puede haberse producido deslizamiento generalizado.



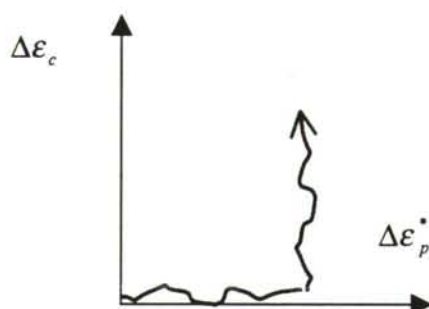


Figura 10.5.2.1-5

En la Figura 10.5.2.1-5 se detecta deslizamiento del cordón de pretensado instrumentado, seguido del deslizamiento de uno o los dos cordones restantes (en la segunda parte de la curva, el cordón instrumentado no experimenta variación de deformación, el hormigón sí). Esto indica que en el extremo de la viga puede haberse producido deslizamiento generalizado.

La medida de la deformación del hormigón es una forma de “auscultar” los deslizamientos en esa sección.

### 10.5.2.2. Criterios de determinación de la forma de rotura

Para establecer un criterio objetivo de determinación de la forma de rotura, es necesario responder a las siguientes preguntas:

- ¿Cuántos cordones han de deslizar para que se considere fallo del anclaje?  
Todos los cordones de pretensado inferiores de al menos un extremo han de presentar deslizamientos. Es posible que durante el ensayo, al deslizar un cordón de pretensado se produzca una redistribución de la pérdida que experimente entre los demás cordones que permanecen anclados. Consideraremos el pretensado como una unidad, mientras se alcance la capacidad nominal de la viga, aunque se haya producido deslizamiento de algún cordón o de todos, consideraremos rotura a flexión.
- ¿Qué valor de deslizamiento se considera para analizar el tipo de rotura, el deslizamiento local (medido a través de las galgas de cable) o el deslizamiento generalizado? En el caso de que se detecte deslizamiento local, para un momento flector menor que el nominal, y no se alcance la capacidad resistente nominal, diremos que la rotura es por fallo de la adherencia. Si se detecta deslizamiento local, pero se alcanza la capacidad nominal de la viga, diremos que el fallo es por flexión-adherencia.
- ¿Qué deslizamiento mínimo se establece para determinar un tipo de rotura u otro?  
La sensibilidad de los transductores de desplazamiento en el SAD empleado en estos ensayos es de aproximadamente 0.01 mm, por lo que no detectaremos valores más bajos de deslizamiento con los transductores. Según la bibliografía (véase Capítulo 2) un deslizamiento de 0.01 mm supone un valor elevado para el deslizamiento.
- Además, para que la rotura sea debida a fallo del anclaje, el momento último ha de ser menor que el nominal, por ejemplo más de un 5% inferior.
- Se dirá que no se ha detectado deslizamiento cuando se tenga la certeza de que el deslizamiento de al menos un cordón en cada extremo no supera los 0.01 mm.

- Se dirá que se ha producido deslizamiento si en uno de los extremos han deslizado todos los cordones de pretensado.
- Si no se cumple ninguna de las condiciones anteriores diremos que el deslizamiento es dudoso.

En las Tablas 10.5.2.2-1 y 10.5.2.2-2 se proporciona una relación de los tipos de rotura y su nomenclatura:

Tabla 10.5.2.2-1

RD	Rotura dúctil
RF	Rotura frágil
DU	Rotura dudosa, se produce cuando se desconoce la variación de deformación máxima en la zona central (vigas HL10-1)
D	Deslizamiento generalizado
ND	Ausencia de deslizamiento generalizado
DD	Deslizamiento dudoso
$l_{bpd}$	Longitud de anclaje
$L_e$	Distancia entre el extremo de la viga y la carga aplicada más cercana ("embedment length")

Tabla 10.5.2.2-2: Denominación de tipos de rotura/longitud de anclaje

Tipo de rotura	Deslizamiento	Nomenclatura	Condición	Longitud de anclaje
Dúctil (RD)	Detectado deslizamiento (D)	RD-D		$l_{bpd} \approx L_e$
Dúctil (RD)	No detectado deslizamiento (ND)	RD-ND		$l_{bpd} < L_e$
Dúctil (RD)	Deslizamiento dudoso (DD)	RD-DD		$l_{bpd} \leq L_e$
Frágil (RF)	Detectado deslizamiento (D)	RF-D		$l_{bpd} > L_e$
Frágil (RF)	No detectado deslizamiento (ND)	RF-ND		DUDOSO, analizar resistencias de los ensayos de acompañamiento
Frágil (RF)	Deslizamiento dudoso (DD)	RF-DD		$l_{bpd} > L_e$
Dudosa (DU)	Deslizamiento dudoso (DD)	DU-DD	$M_{\max} \geq M_u$	$l_{bpd} \leq L_e$
Dudosa (DU)	Deslizamiento dudoso (DD)	DU-DD	$M_{\max} < M_u$	$l_{bpd} > L_e$

### 10.5.3. PROCEDIMIENTO DE ESTIMACIÓN DE LA FUERZA DE PRETENSADO A PARTIR DE LAS MEDIDAS DE DEFORMACIONES

Para determinar el tipo de rotura que se produce en una viga, dúctil o frágil, es necesario reconocer si el pretensado ha plastificado o no en la fase de prerrotura. Para ello, la única información de que disponemos es la deformación total del pretensado o la variación de deformación del pretensado durante el ensayo.

La plastificación del pretensado se habrá producido si se cumple la condición:

$$\sigma_p(x, t) = F(\varepsilon_p^*(x, t)) \geq f_{py}$$

$\varepsilon_p^*(x, t)$  deformación total del pretensado (alambre), en la sección  $x$  a la edad  $t$

$\sigma_p(x, t)$  tensión del pretensado, en la sección  $x$  a la edad  $t$

$f_{py}$  límite elástico del pretensado



Antes de la transferencia de pretensado, al haber instrumentado los anclajes de la bancada con células de carga, conocemos la relación tensión-deformación de las galgas adheridas al pretensado, hasta el instante mismo de la transferencia. Una vez que el pretensado ha sido transferido a las vigas pasamos a tener información de las deformaciones únicamente.

En vigas pretensadas de armadura pretesa, anclada únicamente por adherencia, somos capaces de instrumentar las deformaciones del pretensado y del hormigón, pero no los valores de tensión del pretensado.

### Determinación de la tensión aparente del pretensado

El paso de deformaciones a tensiones a la edad  $t$  no es inmediato debido al proceso de relajación del pretensado. Si aplicamos directamente la relación  $\sigma_p = F(\epsilon_p^*)$  obtenida durante el tesado, estaremos sobrevalorando la fuerza de pretensado. Al valor así determinado hemos convenido en llamarle  $\sigma_{p,ap}(t)$ , tensión de pretensado aparente.

Si aplicamos la expresión fuerza de pretensado-deformación de la galga, obtenida durante el tesado, obtendremos una tensión “aparente” del pretensado, que no será la que realmente experimenta éste, debido a que el acero no es completamente elástico, sino que tiene una deformación plástica. Además, no es completamente lineal. La estimación de la carga de pretensado a través de las deformaciones, se basa en la curva de regresión obtenida durante el tesado, con la rama noval de carga.

Por esta razón existirá un desfase entre las deformaciones del pretensado durante el proceso de tesado, y las deformaciones durante la transferencia. Por ello, aplicando la curva obtenida durante el tesado, correspondiente a la rama noval de carga, estaremos sobrevalorando la fuerza de pretensado. La rama de descarga estará situada por debajo de la de carga. Esto se puede observar en la Figura 10.5.3-1.

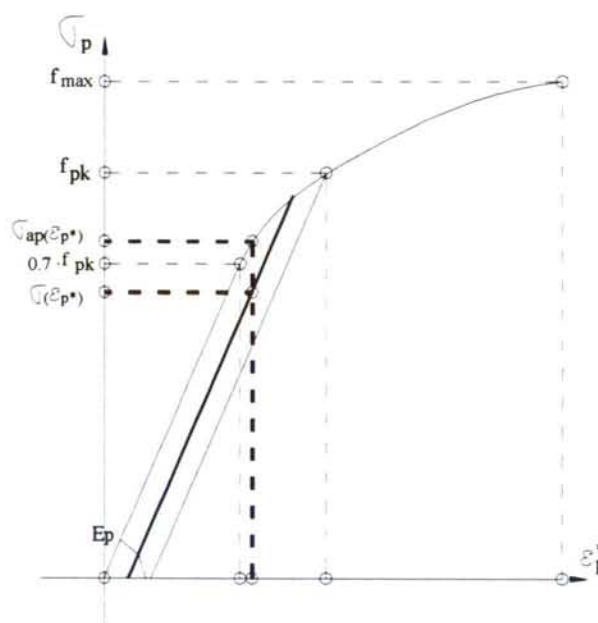


Figura 10.5.3-1

La tensión aparente de pretensado la determinamos a partir de la transferencia (cuando ya no nos proporcionan información las células de carga), a partir de la relación fuerza de pretensado-deformación obtenida durante el tesado. Esta aproximación es lineal en la mayor parte de las galgas, por lo que estaremos cometiendo un error para las tensiones superiores al límite de proporcionalidad.

De esta forma, a partir de la relación fuerza-deformación obtenida durante el tesado, disponemos para cada edad y para cada galga de pretensado, de  $P_{ap}(x, t)$ , fuerza de pretensado aparente en la sección a "x" metros del extremo Sur, a una edad  $t$ .

A partir de este valor determinaremos una fuerza o tensión de pretensado estimada, que tenga en cuenta de forma aproximada las pérdidas de relajación.

### Estimación de la relajación del pretensado

La relajación se define como la pérdida de carga a deformación constante. Esto implica que, aunque una viga pretensada no experimentase deformación por fluencia y retracción del hormigón, es decir, aun cuando la viga no experimentase cambios de longitud, se produciría una pérdida de tensión del pretensado con el tiempo.

Entre la fabricación y el ensayo hasta rotura de una viga pasa un cierto tiempo, entre mes y medio y 10 meses. En ese tiempo se produce relajación del pretensado, retracción y fluencia del hormigón.

A medida que transcurre el tiempo desde la transferencia, se produce una pérdida de pretensado debido a los conocidos fenómenos de deformación diferida del hormigón y el pretensado. Con la instrumentación de que disponemos, conocemos en cada momento la deformación del pretensado.

Si al final de ese período conocemos la deformación del pretensado, ya no será aplicable la curva deformación-tensión correspondiente al diagrama carga unitaria-deformación determinado durante el tesado. Si aplicamos esta relación tenso-deformacional, la tensión estimada será mayor que la que realmente existe, debido precisamente a la relajación.

En adelante vamos a suponer que la relajación no afecta a la forma del diagrama tensión-deformación, es decir, manteniendo constante la deformación del pretensado que corresponde a una tensión inicial  $\sigma_p(t_0)$ , se produce una pérdida de tensión sin que varíe la deformación. Si, a la edad  $t$  aumenta la tensión del pretensado, suponemos que seguirá siendo válida la forma de la curva tensión-deformación, pero se habrá trasladado verticalmente. Esto se puede ver en la Figura 10.5.3-2:



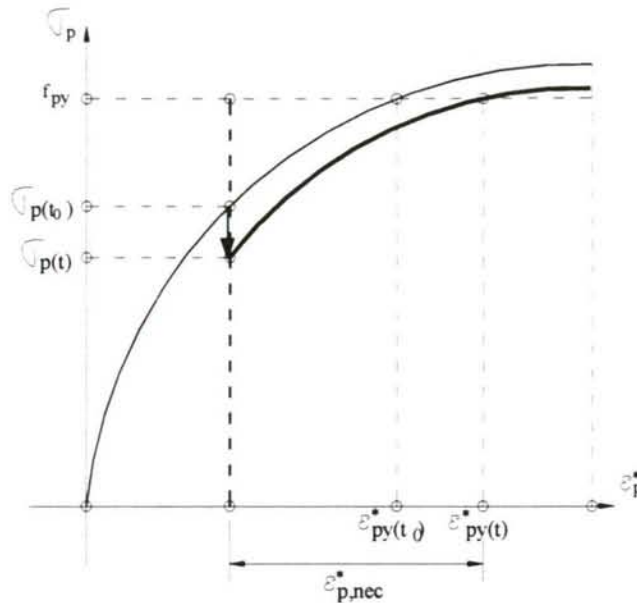


Figura 10.5.3-2

Este proceso presupone que la curva tensión-deformación instantánea sigue vigente tras la relajación del pretensado, es decir, sólo se ha trasladado paralelamente al eje de tensión, en sentido descendente.

Definimos  $\Delta \varepsilon_{p,nec}^*$  como la variación de deformación necesaria para que el pretensado alcance a la edad  $t$  partiendo de una tensión  $\sigma_p(t)$  el límite elástico,  $f_{py}$ .

$$\Delta \varepsilon_{p,nec}^* = \varepsilon_p^*(f_{py}) - \varepsilon_p^*(\sigma_p(t))$$

Si conocemos  $\Delta \varepsilon_{p,nec}^*$ , para analizar un ensayo de una viga a flexión, sólo deberemos calcular la variación de deformación detectada para las galgas de pretensado,  $\Delta \varepsilon_{p,máx}$  durante el ensayo, y comparar ambos valores.

En todo momento nos estamos refiriendo a deformaciones medidas durante el ensayo. Lo que medimos son deformaciones a lo largo de un alambre.

La relación deformación alambre-tensión, hasta la tensión máxima de tesado, la hemos determinado durante el tesado para determinadas galgas. La fuerza de tesado inicial es menor que el límite elástico, por lo que tenemos que extrapolar parte de la curva.

Para ello empleamos la curva deformación-tensión del cordón propuesta por la norma EHE. Esta curva consta de dos tramos: uno lineal hasta el límite de proporcionalidad y uno polinómico de quinto grado en tensiones, a partir de ese límite. Para aplicar esta curva hemos determinado la relación entre la deformación del alambre y la deformación del cordón, aplicando regresión lineal a los datos del tesado (Capítulo 4).

1. Determinación de la regresión lineal entre  $\varepsilon_p = \varepsilon_{p,alambre} = F(\varepsilon_{p,corión})$  durante el tesado.

2. Determinación de la ley  $\varepsilon_p(\sigma_p)$  del alambre, a partir de la del cordón y la relación anterior.
3. Se estima  $\sigma_{p,est}(x,t)$
4. Se calcula el aumento de deformación de alambre necesaria para plastificar el pretensado.

$$\Delta\varepsilon_{p,nec} = \varepsilon_p(f_{py}) - \varepsilon_p(\sigma_p(t))$$

Cuando se determina el diagrama momento-curvatura teórico, empleando este procedimiento se determina el momento flector para el cual plastifica el pretensado en la zona central, y la variación de deformación necesaria.

### Límite elástico considerado

Conocemos los resultados de los ensayos realizados sobre una muestra de cordón de pretensado, de la bobina de cordón de pretensado que hemos empleado para todos estos ensayos (véase Capítulo 4).

De esta muestra conocemos el límite elástico “real”, obtenido aplicando el procedimiento habitual, y el límite elástico garantizado por el fabricante. La duda que surge es ¿qué límite elástico empleamos, el garantizado o el de la muestra?

El límite elástico empleado a efectos de cálculo es el límite elástico garantizado, que por definición es una cota inferior del valor de la muestra en el 95% de los casos. Por esto, parece más correcto emplear este valor garantizado, y no un valor puntual de una muestra.

En todo este capítulo, se ha tomado como valor del límite elástico:

$$f_{py} = f_{pyk} = 229kN$$

### Determinación de la curva de relajación aproximada

El único parámetro de relajación que conocemos, de la partida a que pertenece el pretensado, es el porcentaje máximo de relajación garantizado por el fabricante a las 1000 horas, para una tensión del 70% de la carga unitaria máxima.

Desconocemos el valor de la relajación a las 120 horas, o a otra edad, para la misma tensión de pretensado, por lo que no disponemos de datos para estimar el coeficiente de relajación a una edad diferente de las 1000 horas.

A través de los valores orientativos del coeficiente de relajación de la norma EHE, para la determinación de la pérdida por relajación del pretensado a edades menores de 1000 horas (EHE98), ajustando a estos puntos una curva logarítmica por mínimos cuadrados, se obtiene una curva con coeficiente  $R^2$  superior a 0.9. Esta expresión nos proporciona de manera aproximada el porcentaje de relajación transcurrido un tiempo dado desde la aplicación de una tensión constante. La curva proporciona un valor de relajación para un millón de horas de entre el 4 y el 5%, valor que se aproxima al orientativo de la EHE para esa edad. Por ello adoptamos esta curva, que nos



proporciona valores suficientemente aproximados, a nuestro juicio, de la pérdida por relajación.

### Determinación de $\sigma_{p,est}(t)$

El procedimiento empleado para determinar la fuerza de pretensado a una edad cualquiera tras la transferencia es el siguiente:

1. Al final del tesado, la tensión estimada coincide con la aparente, no se han producido deformaciones diferidas, conocemos  $\sigma_{p,est}(0) = \sigma_{p,ap}(0)$ .
2. Se determina para cada edad la tensión aparente del pretensado,  $\sigma_{p,ap}(i)$ . La tensión aparente no coincide con la estimada debido a efectos térmicos y a relajación del pretensado.
3. Calculamos la pérdida de tensión por relajación:

$$\Delta\sigma_{p,rel}(i-1,i) = (\rho(t_i) - \rho(t_{i-1})) \cdot \sigma_{p,est}(i-1)$$

$\Delta\sigma_{p,rel}(i-1,i)$  pérdidas por relajación del pretensado entre  $t_{i-1}$  y  $t_i$   
 $\rho(t)$  porcentaje de pérdidas de relajación transcurridos  $t$  días del tesado definitivo

lo que equivale a suponer que la tensión real de la etapa  $i-1$  se mantiene constante hasta  $i$ , por lo que se calculan pérdidas de relajación proporcionales a esta tensión, pérdidas que se aplican al final de la etapa  $i$ .

$$\sigma_{p,est}(i) = \sigma_{p,ap}(i) - \Delta\sigma_{p,rel}(i-1,i)$$

4. La tensión aparente disminuye debido a: pérdidas por retracción, por fluencia y por fisuración por hendimiento, que posiblemente conduce a deslizamientos del pretensado, aumentando la longitud de transmisión y produciendo pérdidas adicionales.
5. Finalmente aproximamos:  $\sigma_p(t) = \sigma_{p,est}(t)$

De esta forma y de manera aproximada se determinan pérdidas por relajación.

Este procedimiento es el empleado para estimar la fuerza de pretensado tras la transferencia, a partir de las lecturas de deformación de las bandas de pretensado.

Así, con los resultados de un ensayo se pueden determinar las pérdidas de pretensado, y calcular el aumento de deformación necesario para que se considere el pretensado plastificado, y poder determinar si la forma de rotura que se produce es dúctil o frágil.

## 10.6. ANÁLISIS DE LAS VIGAS ENSAYADAS A FLEXIÓN

Como ya se explicó anteriormente, se fabricaron tres vigas iguales de cada cuantía de armadura de confinamiento/material:

1. Una de las vigas se pretendía ensayar a carga centrada, es decir, frente a cargas simétricas respecto a centro luz, lo suficientemente alejadas de los apoyos para estar fuera de la longitud de anclaje. La zona central había de ser lo suficientemente amplia para que se consiguiese un estado de deformación plana en la sección central: se estimó que sería conveniente un mínimo de un metro (dos cantos y medio de la viga) para este fin. El tipo de rotura de la viga previsto por el diseño de la sección transversal es rotura dúctil, para las pérdidas de pretensado previstas. De esta forma se vería la incidencia de la armadura de confinamiento en el momento último y tipo de rotura.
2. Si la rotura de la viga anterior hubiese sido dúctil, es decir, si se estimase que la armadura activa hubiese plastificado en la parte de la viga más solicitada, la zona central, sin haberse producido deslizamiento generalizado, la segunda viga se ensayaría a una distancia menor desde ambos apoyos. La idea, dado el reducido número de ejemplares iguales, es acotar la longitud de anclaje del lado de la seguridad.
3. La tercera viga se conserva actualmente para estudiar deformaciones diferidas, el avance de la fisuración por hendimiento, las pérdidas de pretensado. En función de los resultados obtenidos en el presente trabajo se ensayarían a carga sostenida o, en su caso, a fatiga.

Las galgas extensométricas de pretensado centrales se dispusieron a 3.5 metros de los extremos (vigas de HL10-1), y a 4 metros desde ambos extremos (vigas de HL10-2 y vigas de HC).



*Fotografía 10.6-1: Sistema de instrumentación y control, y zona de ensayo*



*Fotografía 10.6-2: Pórtico de carga, viga de reparto y viga ensayada*

En las Fotografías 10.6-1 y 10.6-2 se aprecia la configuración del ensayo. En esta última se observa una viga de hormigón, tras el ensayo. Se observan las fisuras de flexión en la cara lateral, y la disposición de las galgas extensométricas, tres en cada sección, para evaluar la curvatura de la sección.



Debido a la limitación de la precisión de los transductores de para medir deslizamientos del pretensado, de milésimas o centésimas de milímetros, en los últimos ensayos se decidió disponer además relojes comparadores. De esta forma se tenía una medida redundante. Se dispusieron tres relojes comparadores; dos de 0.01 mm de precisión y uno de 0.001 mm de precisión, de la marca Mitutoyo. El reloj más preciso se colocó en cada ensayo en el cordón central del extremo de la viga más cercano a la zona de corte de pretensado, extremo que por estar más dañado presentaría en principio más tendencia a deslizarse. Esto se puede observar en la Fotografía 10.6-3.



*Fotografía 10.6-3: Relojes comparadores y transductores de desplazamiento*

Para determinar el diagrama momento-curvatura teórico, se estimó previamente el valor de la fuerza de neutralización del pretensado inferior y superior. En la Tabla 10.6-2 aparecen los valores de fuerza de neutralización, y las propiedades del hormigón a la edad de ensayo de la viga.

En los pies de las gráficas de los siguientes apartados se ha incluido un esquema, a fin de facilitar la comprensión de las mismas, detallado en la Figura 10.6-1 y en la Tabla 10.6-1, donde:

$P_{sup}$	fuerza de pretensado superior
$P_{inf}$	fuerza de pretensado inferior
$P_{n,total}$	fuerza de neutralización estimada total
$P_{n,sup}$	fuerza de neutralización estimada superior
$P_{n,inf}$	fuerza de neutralización estimada inferior





Tabla 10.6-2

Viga	Armadura de confinamiento	Edad de ensayo	$f_{c, cub}$	$f_{c, cil}$	ec	$f_{ct}$	$f_{ct}$	$P_{sup}$	$P_{inf}$	$P_{n, total}$	$P_{n, sup}$	$P_{n, inf}$
		Días	MPa	MPa	MPa	kN	kN	kN	kN	kp	kp	kp
V6L10-1	c 8 a 15	55	63.12	58.42	19412.5		2.99	167	471	715	167	167
V12L10-1	c 8 a 15	61	63.99	59.31	18770.195		3.03	175	495	754	167	167
V11L10-1	c 8 a 15	74	68.25	59.25	20244.645		3.11	171	483	730	167	167
V10L10-1	c 8 a 15	136	70.665	59.10	20598.49		3.48	168	474	716	167	167
V7L10-1	c 8 a 15	289	67.515	61.40	20040.235	310.495	4.37	160	450	682	167	167
V3L10-2	c 6 a 10	47	89.185	65.955	27957.16	216.815	2.99	184	498	741	167	167
V1L10-2	c 8 a 20	91	71.95	69.1795	27516.92	298.51	4.11	183	504	747	167	167
V4C	c 8 a 15	49	68.86	68.9185	30509.435	271.18	3.90	180	495	729	167	167
V6C	c 6 a 15	56	73.91	73.364	31839.97	266.29	3.83	178	492	721	167	167

### 10.6.1. ENSAYOS REALIZADOS PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD RESISTENTE A FLEXIÓN DE LAS VIGAS

Se dispuso una distancia de aplicación de las cargas puntuales centrales a los extremos de las vigas, a fin de obtener una rotura por flexión. De esta forma, estos ensayos servirían para determinar el comportamiento de la viga a lo largo del ensayo, la capacidad resistente a flexión, y la ductilidad de las vigas de los diferentes materiales. En este apartado se realiza un análisis de los datos proporcionados por la instrumentación, a fin de determinar el tipo de rotura de cada viga ensayada. Mediante estos ensayos se pretendía acotar superiormente la longitud de anclaje de las vigas.

Para cada viga se proporciona una tabla resumen de los resultados más relevantes:

- Peso propio de la viga (inicialmente la viga “se pesa” al colocarla sobre las células de carga de los apoyos) y, por lo tanto, la densidad.
- Distancia de la carga aplicada al extremo de la viga, reacción de apoyo máxima (máximos valores del esfuerzo cortante).
- Máximo esfuerzo cortante en la zona central.
- Flecha en centro luz máxima.

Además se proporciona el diagrama {momento flector máximo} respecto a la {flecha en centro luz}, así como las gráficas que hemos juzgado más representativas para evaluar el comportamiento de las vigas.

En las Gráficas 10.6.1-1 a 10.6.1-6 se aprecian los diagramas tensión deformación que se emplearon en la obtención de los diagramas momento-curvatura. Estos diagramas se obtuvieron durante el ensayo a rotura de probetas cilíndricas, de la misma amasada que la viga ensayada, a la edad de ensayo. Las probetas se instrumentaron mediante bandas extensométricas longitudinales, de 60 mm de longitud, centradas en la altura de las probetas. En estas gráficas se aprecia el diferente comportamiento tenso-deformacional de cada material, a la edad de ensayo.

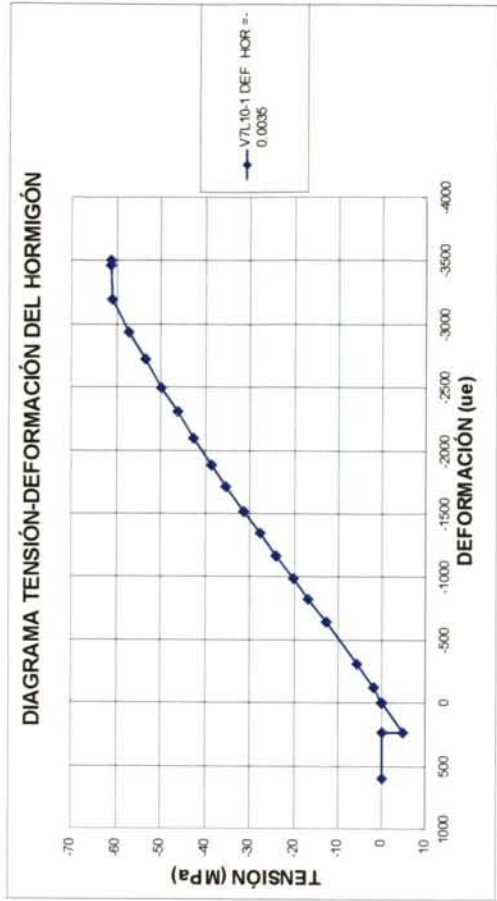
Dado que el control del ensayo de rotura se efectuó por carga, no se dispone de la deformación última de las probetas de hormigón. Como estos diagramas se emplearon para predecir el comportamiento hasta rotura de cada viga, se supuso para todos ellos una deformación máxima del 0.35%, para determinar la capacidad resistente de las vigas de HC, y del 0.3% y el 0.35% para las vigas de HL10-1.

La rama a tracción se determinó extrapolando el módulo de deformación secante, obtenido en los ensayos de módulo de las probetas cilíndricas, a la edad de ensayo. La resistencia a tracción se estimó a partir de la resistencia a tracción obtenida a la edad de transferencia, y la evolución de resistencias a tracción de ese material.

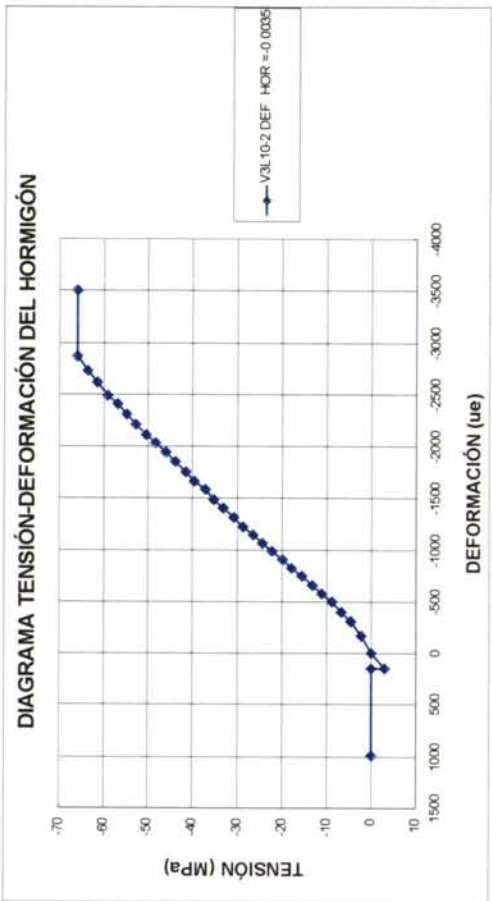
En las Gráficas 10.6.1-1 a 10.6.1-6 se aprecia el comportamiento marcadamente lineal del hormigón ligero, hasta el 60-70% de la resistencia a compresión. El comportamiento es menos lineal en el caso de la probeta de HC, correspondiente a la viga V4C.

Estos diagramas se han empleado para la obtención de los diagramas momento-curvatura teóricos, y la variación de deformación del pretensado inferior teórica durante el ensayo de la viga. En los siguientes apartados se proporcionan, para cada viga, estos diagramas y se comparan con los diagramas experimentales obtenidos durante el ensayo de las vigas a flexión.

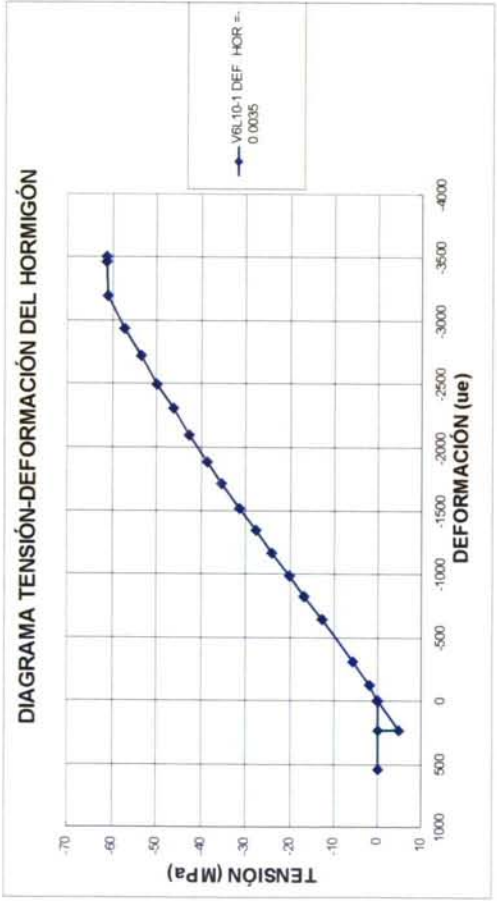




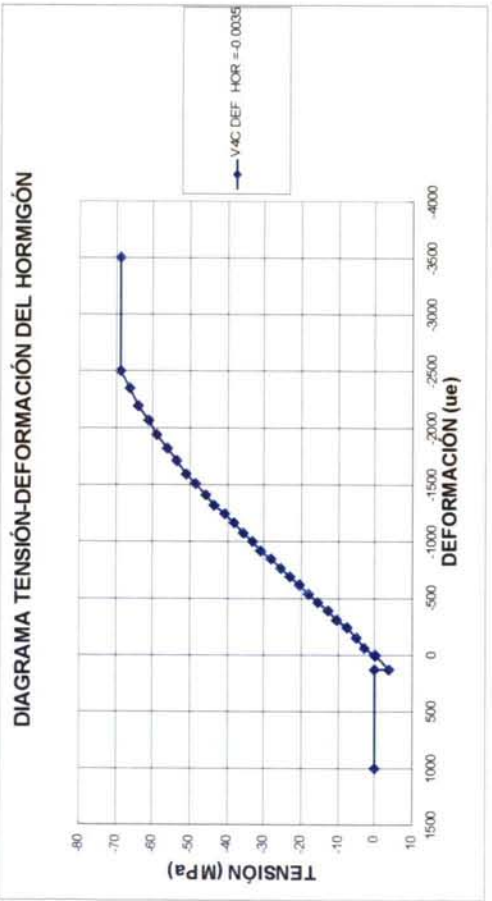
Gráfica 10.6.1-2



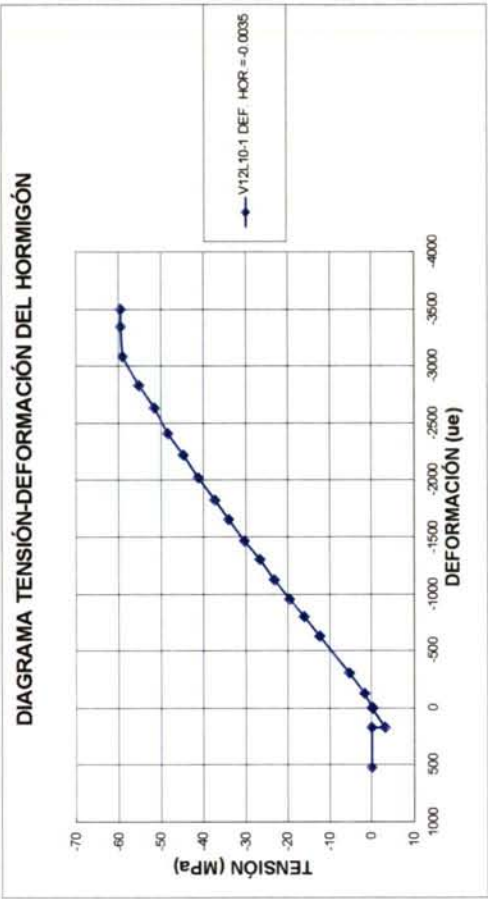
Gráfica 10.6.1-4



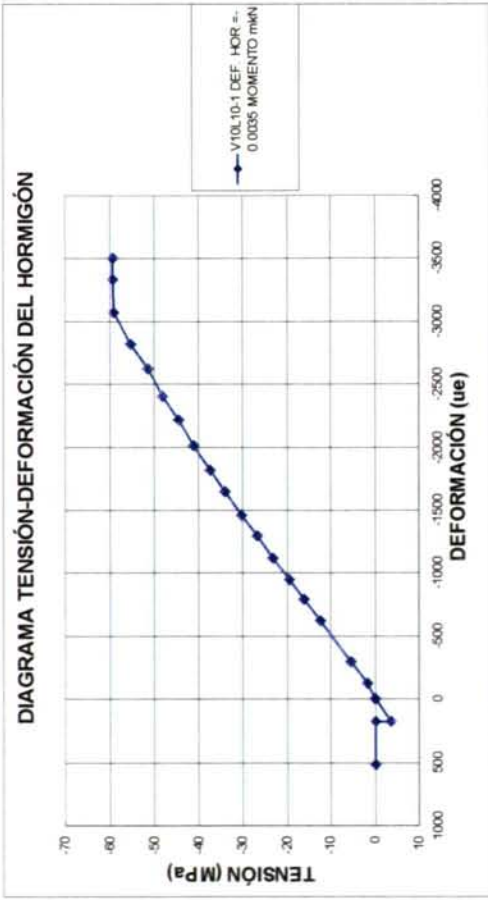
Gráfica 10.6.1-1



Gráfica 10.6.1-3



Gráfica 10.6.1-6



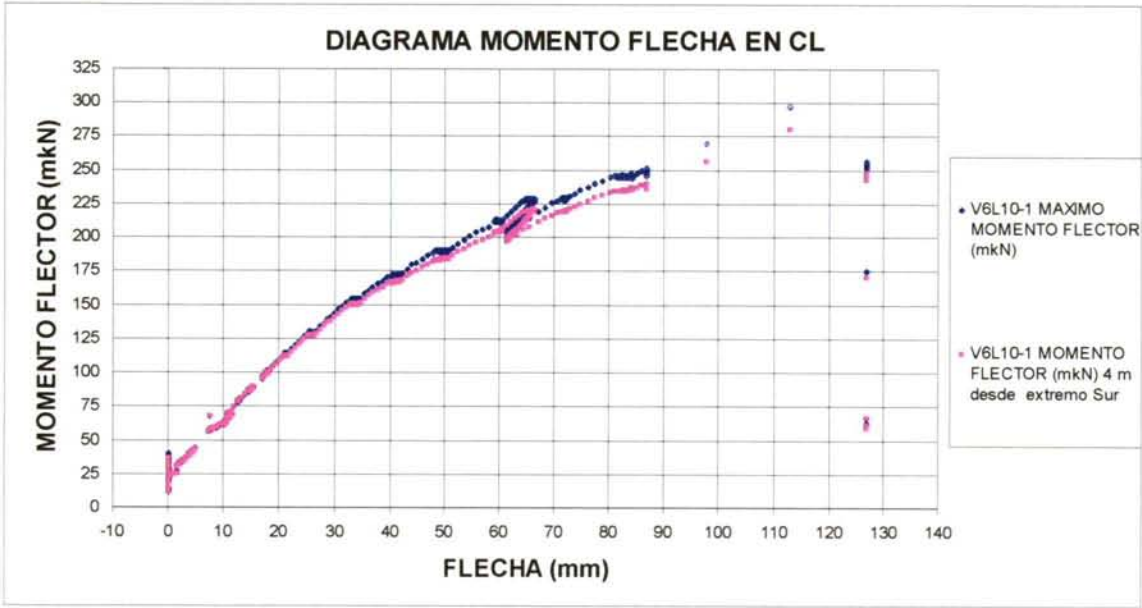
Gráfica 10.6.1-5



10.6.1.1. Viga V6L10-1

Tabla 10.6.1.1-1

Viga	V6L10-1	Máximo	Mínimo	Unidades
Peso viga		14.24		kN
Densidad		19.78		kN/m <sup>3</sup>
Armadura transversal	c 6 a 10			
Distancia desde extremos a cargas aplicadas		4		m
Máximo momento flector		297.1		mkN
Máximo reacción apoyo	Norte	88.7		kN
Máximo reacción apoyo	Sur	83.5		kN
Máx/min esfuerzo cortante zona central (posición, máximo, mínimo)	4.00 m	18.4	-16.0	kN
Máx/min esfuerzo cortante zona central (posición, máximo, mínimo)	5.00 m	17.6	-16.8	kN
Flecha centro luz máxima		126.9		mm
Tangente FI <sup>10.3</sup>	(Ductilidad)	0.037		m/m



Gráfica 10.6.1.1-1

Esta viga se ensayó aplicando la carga mediante dos gatos de 75 mm de carrera cada uno, colocados en serie. Cuando el primer gato terminaba su carrera se accionaba el segundo gato, manteniendo la carga del primer gato. Ni el sistema de control ni el sistema hidráulico estaban preparados para la actuación de los gatos en serie, lo que motivó que la carga aplicada por el segundo gato se realizase de manera brusca y sin respetar las velocidades programadas. De esta forma, el momento último registrado, 297 mkN, es una cota inferior del momento último real. Este fallo se corrigió cambiando de gato en la tercera viga ensayada y siguientes.

<sup>10.3</sup> Se define un parámetro aproximado de ductilidad, cociente entre la máxima flecha en centro luz y la distancia del apoyo a la carga aplicada más cercana:  $\tan\phi = \frac{flecha_{CL}}{l_e - l_a}$ . Este valor proporciona un orden de magnitud de la capacidad de rotación de la viga, en prerrotura.

Analizando el diagrama momento flector-flecha en centro luz (Gráfica 10.6.1.1-1) observamos que durante el ensayo se produjo una descarga parcial de la viga. El tramo lineal finaliza para un momento aproximado de 125 mkN, momento de fisuración aparente. Debido al fallo descrito del sistema de carga sólo disponemos de una cota inferior para el momento último de la viga.

En la Gráfica 10.6.1.1-2 se aprecia el crecimiento de los valores de la deformación en las galgas de pretensado situadas en la parte inferior de la sección, a medida que aumenta la carga aplicada. Se detecta una mayor variación de deformación en el extremo Sur, aparentemente el más cargado. Se observa que la variación máxima de deformación es de:

$$\Delta \varepsilon_{p,máx}^* = 4400 \text{ ue}$$

valor que posteriormente compararemos con la variación de deformación necesaria estimada para considerar el pretensado plastificado en zona central.

En el caso de las vigas de HL10-1, las galgas del pretensado inferior centrales se situaron a 3.5 metros desde ambos extremos, porque se pensó que esta sería una cota superior de la longitud de anclaje. De esta forma, los ensayos se plantearían con cargas situadas a una distancia menor de 3 metros de los extremos. A causa de la fisuración por hendimiento, se adoptó la decisión de ensayar a carga centrada simétrica, situada a 4 metros de los extremos. De esta forma las galgas centrales quedaban fuera de la zona central: estaban situadas en una zona de flexión elevada, pero no máxima. Por ello, aunque se produjese la plastificación del pretensado en la zona central, esto no se tendría que apreciar en las galgas 05 y 06. Por ello, el que no se detecte la plastificación en las galgas centrales no implica que no se haya producido<sup>10.4</sup>.

En la Gráfica 10.6.1.1-3 se aprecia el crecimiento de los valores de la deformación en las galgas de hormigón situadas en la parte superior de la sección (a la altura del pretensado superior, a 75 mm del paramento superior). La deformación máxima registrada es de -1600 ue en centro luz, para la carga máxima.

En las Gráficas 10.6.1.1-4 y 10.6.1.1-5 se aprecia la variación de deformación del pretensado, respecto al momento flector máximo producido en la viga. Se aprecia que para los valores máximos de momento flector alcanzados, la pendiente de las curvas de las galgas centrales es acusada. Se detecta deslizamiento localizado de la galga de pretensado central 06, para un momento de 225 mkN, lo que se repite dos veces más antes de rotura.

En la Gráfica 10.6.1.1-5 no se aprecia deslizamiento de ninguna de las galgas extremas, por lo que se deduce que el deslizamiento detectado en la galga GC 06 afecta sólo a una zona próxima a la misma. La variación de deformación de las galgas más próximas a los extremos es aproximadamente lineal con el momento flector máximo. Se aprecia variación de la deformación de las galgas de pretensado del extremo Sur (zona de la viga más solicitada), incluso en la galga más extrema, GC1. Se observa el fallo de la galga GC09.

<sup>10.4</sup> Esto se subsanó en la segunda serie, en la que las galgas centrales se situaron a 4 metros de los extremos.



Analizando los diagramas momento-curvatura de la Gráfica 10.6.1.1-6 se aprecia una gran similitud entre ambos. La fisuración, caracterizada por la pérdida de linealidad, se produce entre 125 y 140 mkN aproximadamente. No se dispone de la rama hasta rotura de ninguno de los diagramas debido a la rotura de la banda extensométrica inferior.

En la Gráfica 10.6.1.1-7 se observa que la linealidad de las secciones, evaluada a partir del coeficiente  $R$ , es elevada. El cambio del coeficiente  $R$ , de  $-1$  a  $1$  se debe al cambio de curvatura de la viga detectado por las galgas adheridas al hormigón. Hay que puntualizar que las galgas adheridas al hormigón proporcionan datos de deformación relativos, las galgas se pusieron a cero el instante anterior a la puesta en carga de la viga. La viga presenta una curvatura, y por lo tanto, un estado de deformaciones previo al proceso de carga, debido a la acción del pretensado y el peso propio de la viga.

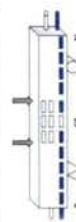
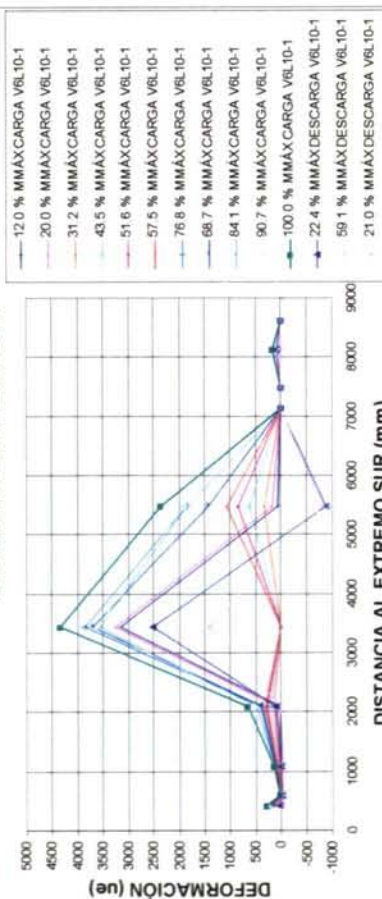
Se aprecia la gran similitud entre el diagrama momento-curvatura teórico y los experimentales. Los valores de momento de fisuración, la tendencia y los valores de curvatura última son muy similares (Gráficas 10.6.1.1-6 y 10.6.1.1-8).

En la Gráfica 10.6.1.1-9 se observa la {variación de deformación teórica del alambre} respecto al {momento flector actuante en la sección} durante el ensayo. Para ello se han considerado las relaciones {deformación del alambre} respecto a la {deformación del cordón} del Apartado 4.4. Si comparamos el comportamiento de la galga 06, situada en la zona central (Gráfica 10.6.1.1-4) y las gráficas teóricas (Gráfica 10.6.1.1-9), se aprecia una cierta similitud hasta un momento de 225 mkN. A partir de ese valor las gráficas difieren, debido a que se produjo el deslizamiento de la galga central 06. A pesar del deslizamiento, el valor elevado de variación de deformación de la galga indica plastificación del pretensado. La plastificación teórica corresponde a un momento de 274 mkN, al que corresponde una variación de deformación de 4225 y 4304 ue, según cada una de las aproximaciones.

En la Gráfica 10.6.1.1-10 se aprecia deslizamiento del cordón de pretensado instrumentado, cordón 3, en el extremo Sur a 600 mm del extremo. Esto no implica que haya habido deslizamiento en el extremo de la viga.

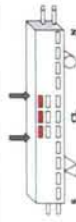
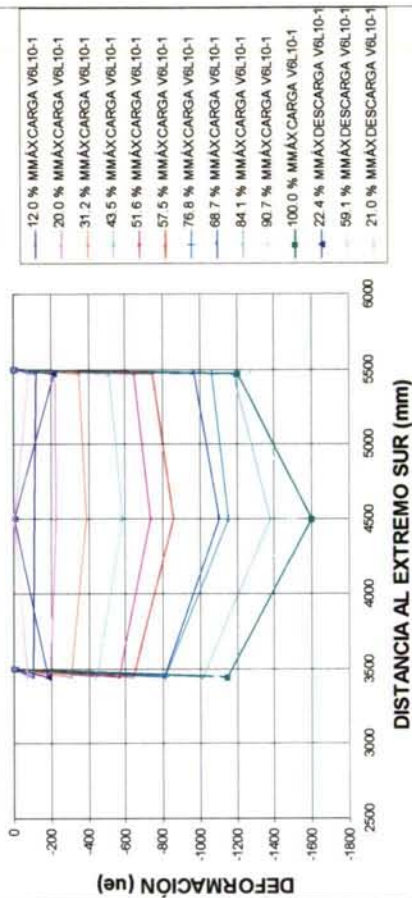
La forma de rotura de la viga fue por agotamiento a compresión del hormigón, en la zona central. También se produjo pandeo de las armaduras comprimidas y del cordón superior de pretensado tras la rotura. No se detectó deslizamiento a partir de los transductores de desplazamiento.

VARIACIÓN DE DEFORMACIÓN DEL PRETENSADO INFERIOR VS  
DISTANCIA A EXTREMO SUR



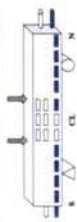
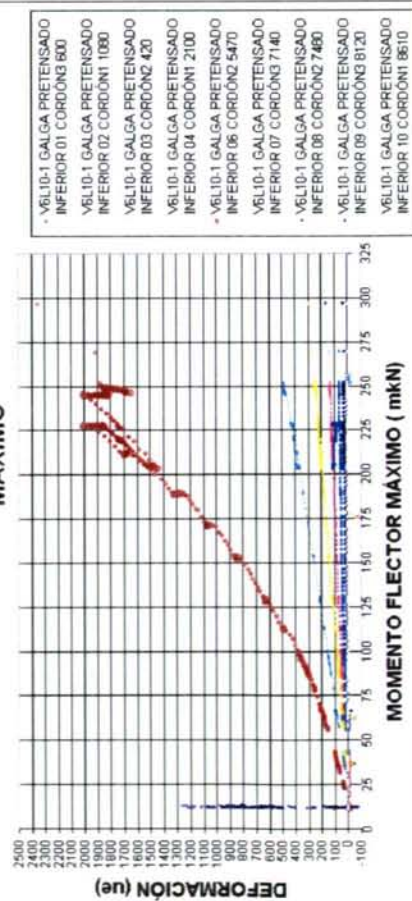
Gráfica 10.6.1.1-2

VARIACIÓN DE DEFORMACIÓN DE GALGAS HORMIGÓN  
SUPERIORES CARA ESTE VS DISTANCIA A EXTREMO SUR



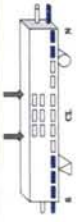
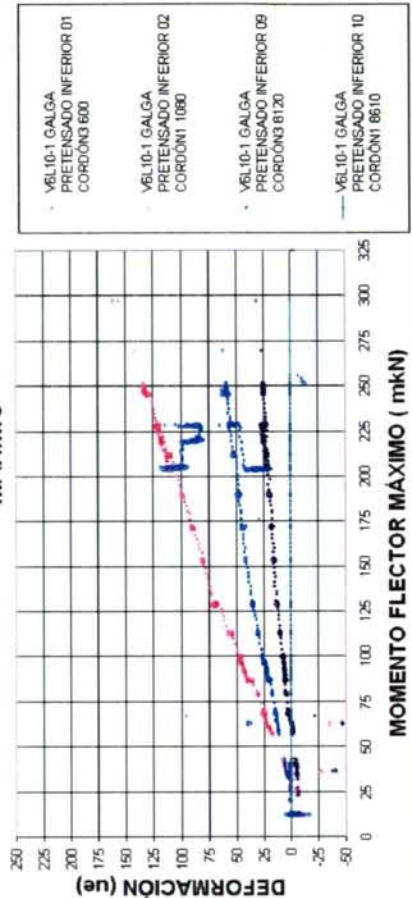
Gráfica 10.6.1.1-3

DEFORMACIÓN GALGAS VS MOMENTO FLECTOR  
MÁXIMO



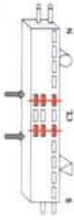
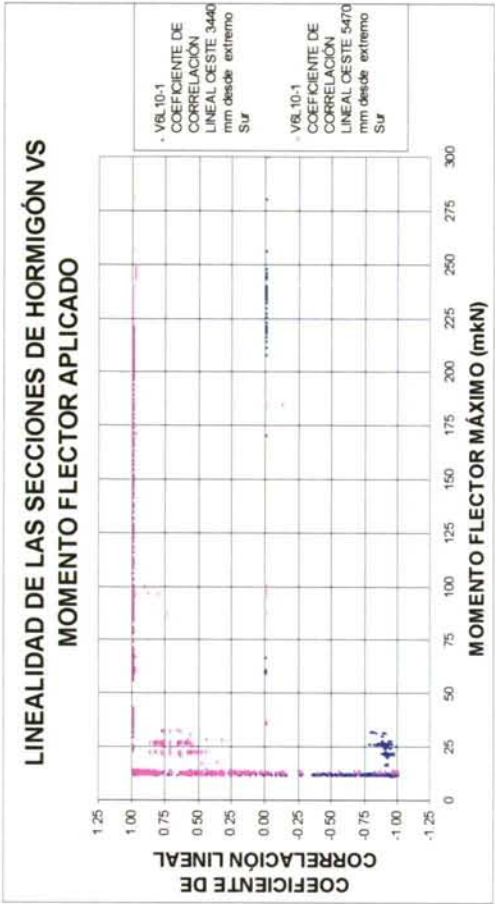
Gráfica 10.6.1.1-4

DEFORMACIÓN GALGAS VS MOMENTO FLECTOR  
MÁXIMO

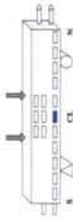
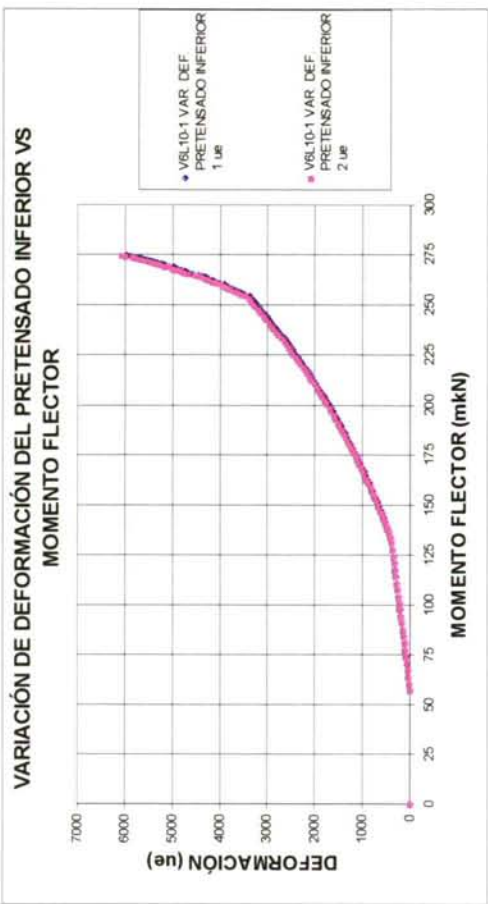


Gráfica 10.6.1.1-5

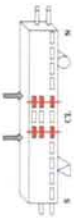
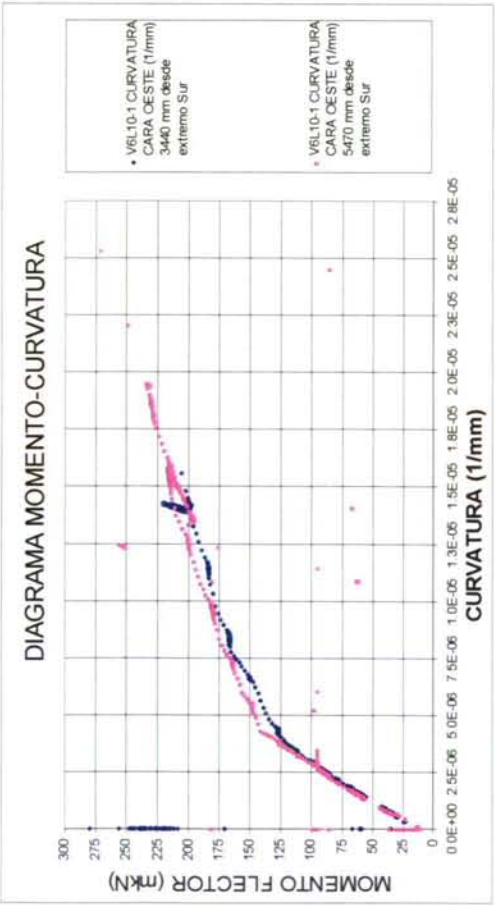




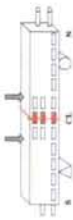
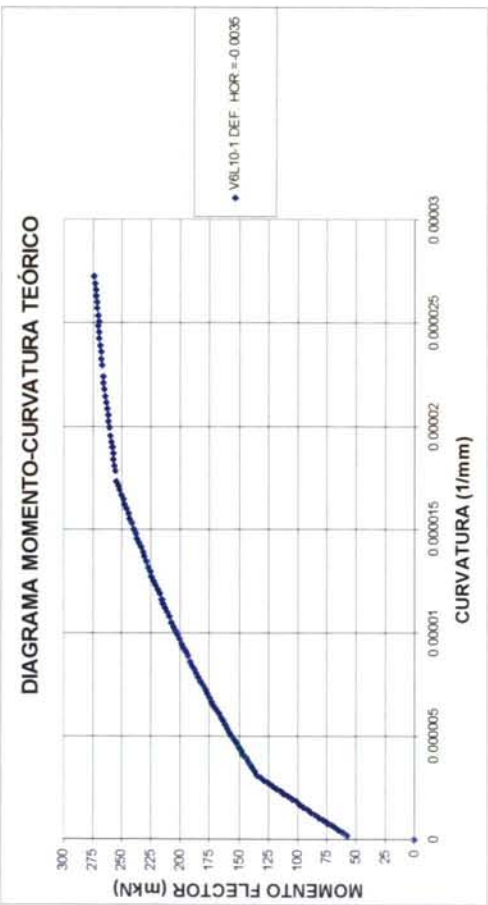
Gráfica 10.6.1.1-7



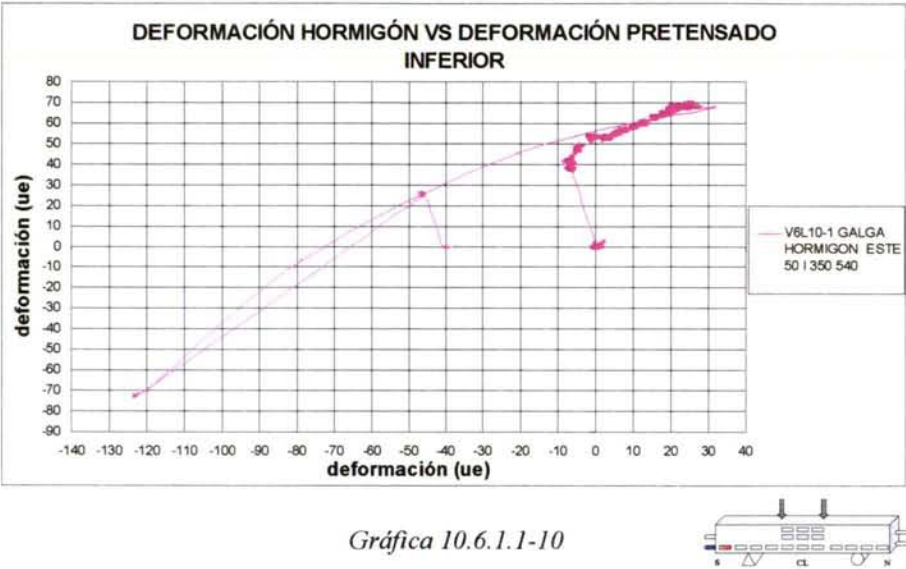
Gráfica 10.6.1.1-9



Gráfica 10.6.1.1-6



Gráfica 10.6.1.1-8



Gráfica 10.6.1.1-10

10.6.1.2. Viga V12L10-1

Tabla 10.6.1.2-1

Viga	V12L10-1	Máximo	Mínimo	Unidad
Peso viga		14.78		kN
Densidad		20.53		kN/m <sup>3</sup>
Armadura transversal	c 8 a 20			
Distancia desde extremos a cargas aplicadas		4		m
Máximo momento flector		281.3		mkN
Máximo reacción apoyo	Norte	81.9		kN
Máximo reacción apoyo	Sur	86.6		kN
Máx/min esfuerzo cortante zona central	4 m	3.4	-15.3	kN
Máx/min esfuerzo cortante zona central	5 m	16.9	-1.7	kN
Máxima flecha		130.5		mm
Tangente FI	(Ductilidad)	0.038		m/m



Gráfica 10.6.1.2-1

Esta es la última viga que se ensayó hasta rotura con el sistema de dos gatos de 75 mm de carrera en serie.



Analizando el diagrama momento flector-flecha en centro luz (Gráfica 10.6.1.2-1) observamos que el tramo lineal finaliza para un momento aproximado de 100-110 mkN, momento de fisuración aparente. Debido al fallo descrito del sistema de carga sólo disponemos de una cota inferior para el momento último de la viga.

En la Gráfica 10.6.1.2-2 se aprecia la variación de deformación de las galgas de pretensado situadas en la parte inferior de la sección, a medida que aumenta la carga aplicada. Se detecta una mayor variación de deformación en el extremo Sur, aparentemente es el más cargado. Se observa que la variación máxima de deformación detectada es de:

$$\Delta \varepsilon_{p,\max}^* = 3100 \text{ ue}$$

valor que posteriormente compararemos con la variación de deformación necesaria estimada para considerar el pretensado plastificado en zona central.

En la Gráfica 10.6.1.2-3 se aprecia el crecimiento de los valores de la deformación en las galgas de hormigón situadas a la altura del pretensado superior (a 75 mm del paramento superior). La deformación máxima registrada es de -1800 ue en centro luz.

En las Gráficas 10.6.1.2-4 y 10.6.1.2-5 se aprecia la variación de deformación del pretensado, respecto al momento flector producido en la viga. Se observa que para los valores máximos de momento flector alcanzados, la pendiente de las curvas de las galgas centrales no es muy pronunciada. Se detecta variación de deformación incluso en las galgas más extremas, lo que indica aumento de tensión del pretensado en esa zona. En estas últimas la variación de deformación es aproximadamente lineal con el momento flector actuante en la zona central. Durante el ensayo no se detecta deslizamiento del pretensado a partir de la medida de las galgas de cable.

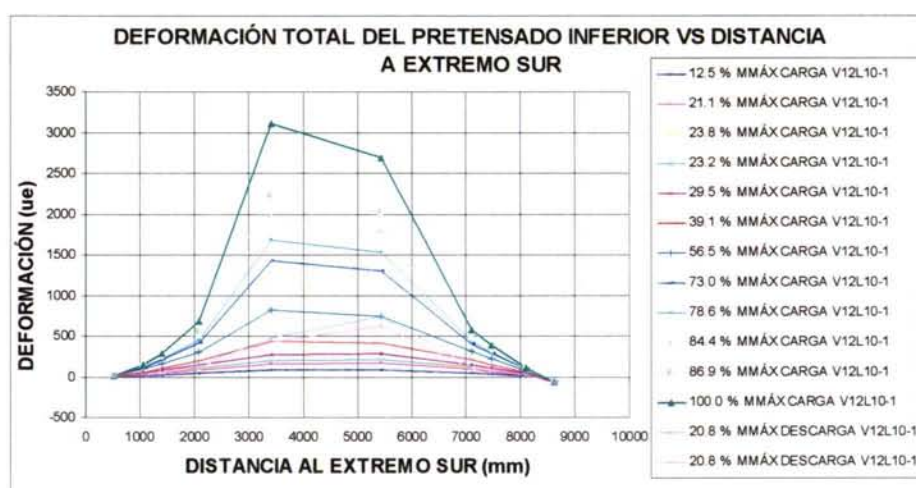
Se aprecia la gran similitud entre el tramo inicial del diagrama momento curvatura teórico y los experimentales. El momento de fisuración aparente, valor promedio entre ambos paramentos en CL, es de 135 mkN aproximadamente (Gráfica 10.6.1.2-6). El momento de fisuración teórico es de 135 a 140 mkN (Gráfica 10.6.1.1-8). No se dispone de la rama hasta el agotamiento de ninguno de los diagramas debido a la rotura de la banda extensométrica inferior.

En la Gráfica 10.6.1.2-7 se observa que el coeficiente  $R$  es elevado. El cambio del coeficiente  $R$ , de -1 a 1 se debe al cambio de curvatura de la viga detectado por las galgas adheridas al hormigón.

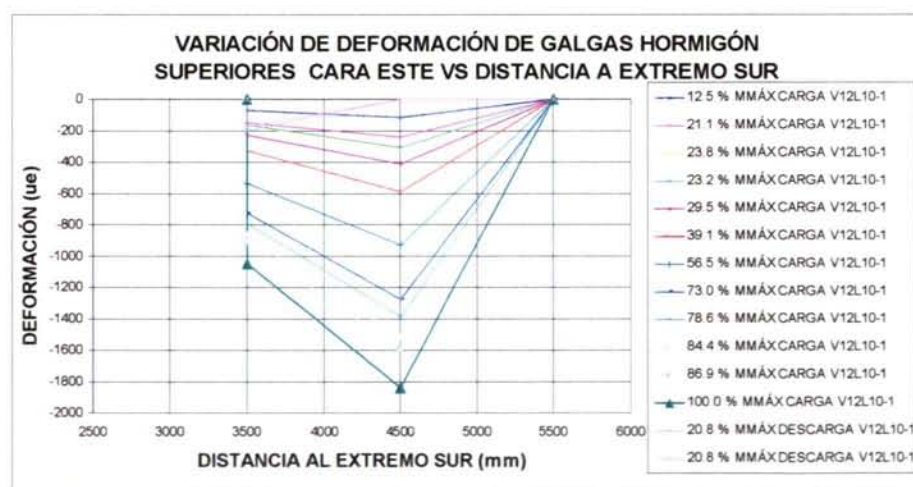
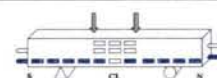
Si comparamos los valores de variación de deformación del pretensado inferior, proporcionados por las curvas teórica y experimental en la zona central, se aprecia una cierta similitud entre el comportamiento de las galgas 05 y 06 (Gráfica 10.6.1.2-4) y las gráficas teóricas (10.6.1.2-9), durante la primera parte del ensayo. Sin embargo los valores de deformación máxima registrados fueron menores que los predichos. La variación de deformación registrada en el pretensado, de 3100 ue, es ligeramente inferior al valor teórico necesario para la plastificación, que se produce teóricamente para un momento de 271 mkN, instante en que la variación de deformación teórica alcanza un valor de 3651 y 3718 ue respectivamente.

Se aprecia un ligero deslizamiento del cordón de pretensado instrumentado, cordón 1, en el extremo Norte a 8550 mm del extremo Sur (véase Gráfica 10.6.1.2-10). Esa sección no está sometida a ninguna variación de esfuerzo durante el ensayo (el apoyo de las vigas se situó a 600 mm de los extremos). La variación de deformación del hormigón en el sentido de perder compresión indica deslizamiento en esa sección, de otro/otros cordones en la misma sección. Sin embargo, esto no implica que haya habido deslizamiento en el extremo de la viga.

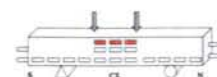
La forma de rotura de la viga fue por agotamiento a compresión del hormigón, en la zona central, a 4.3 m del extremo Sur. También se produjo pandeo de las armaduras comprimidas y del cordón superior de pretensado tras la rotura.



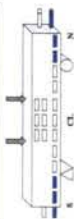
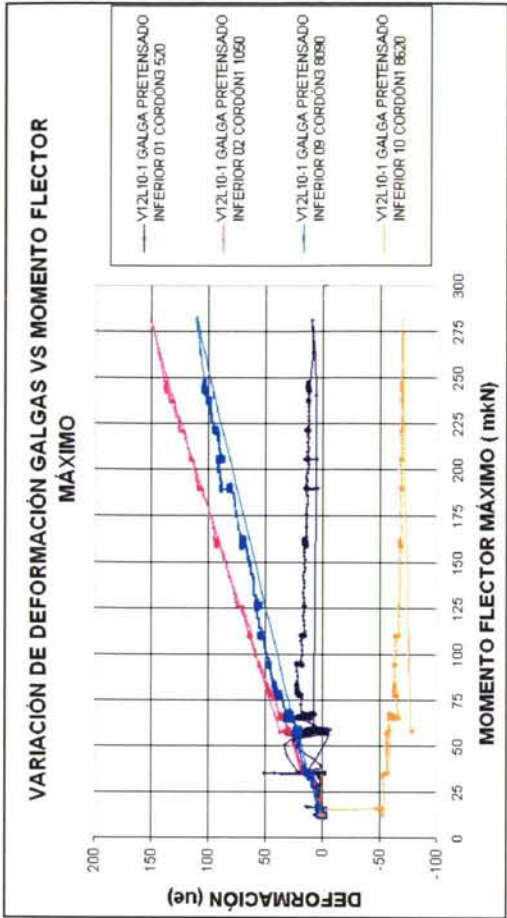
Gráfica 10.6.1.2-2



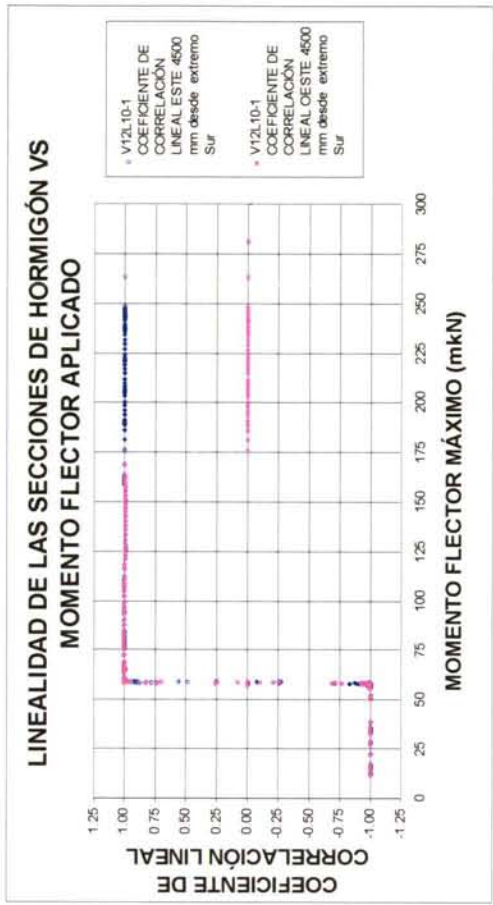
Gráfica 10.6.1.2-3



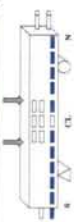
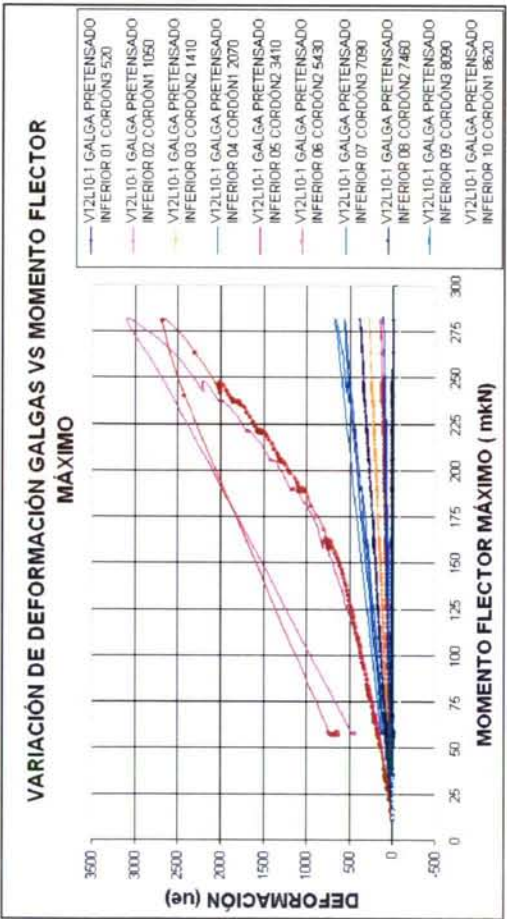




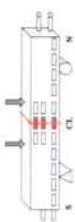
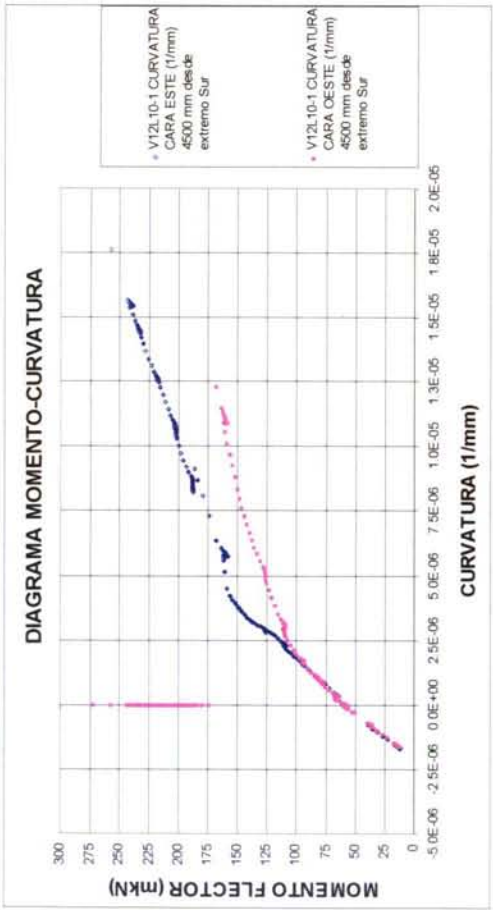
Gráfica 10.6.1.2-5



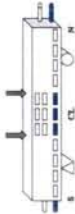
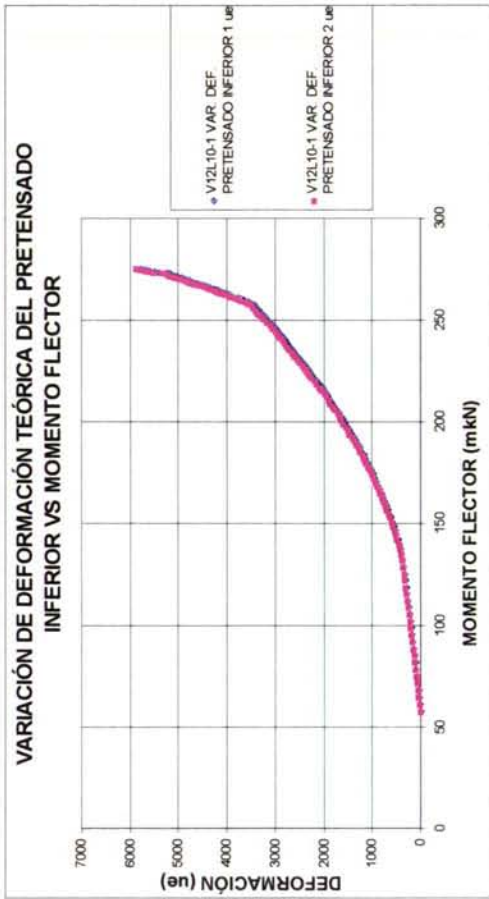
Gráfica 10.6.1.2-7



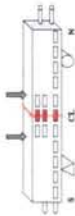
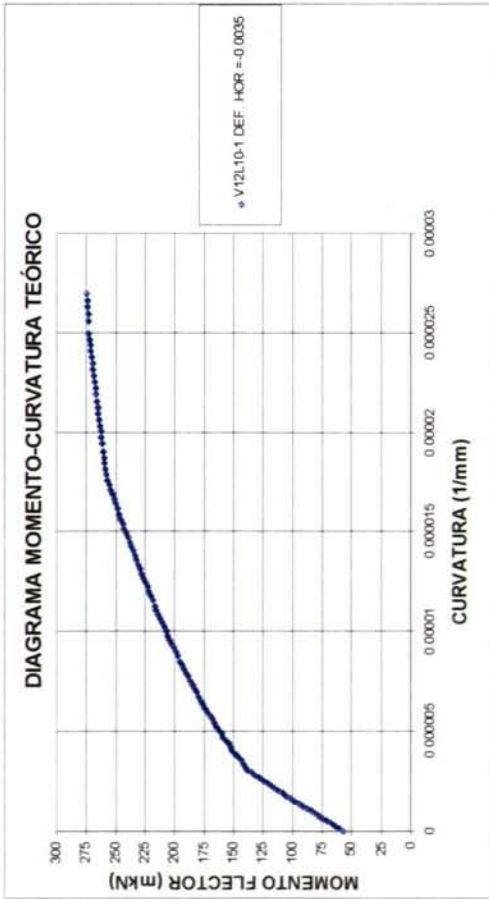
Gráfica 10.6.1.2-4



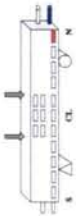
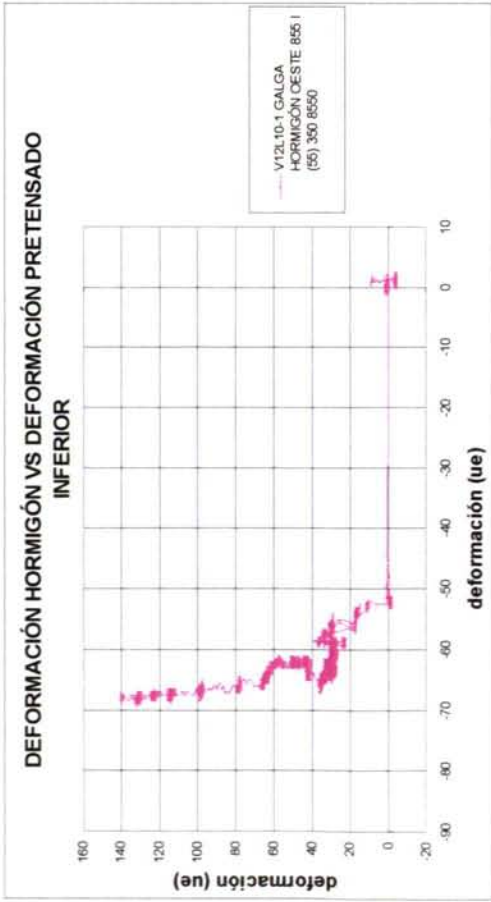
Gráfica 10.6.1.2-6



Gráfica 10.6.1.2-9



Gráfica 10.6.1.2-8



Gráfica 10.6.1.2-10



### 10.6.1.3. Viga V10L10-1

Tabla 10.6.1.3-1

Viga	V10L10-1	Máximo	Mínimo	Unidad
Peso viga		14.80		kN
Densidad		20.56		kN/m <sup>3</sup>
Armadura transversal	c 6 a 15			
Distancia desde extremos a cargas aplicadas		4		m
Máximo momento flector		294.3		mkN
Máximo reacción apoyo	Norte	82.9		kN
Máximo reacción apoyo	Sur	90.4		kN
Máx/min esfuerzo cortante zona central	4.00 m	3.1	-25.5	kN
Máx/min esfuerzo cortante zona central	5.00 m	27.1	-1.5	kN
Máxima flecha		123.6		mm
Tangente FI	(Ductilidad)	0.036		m/m



Gráfica 10.6.1.3-1

Esta viga es la primera ensayada con un único gato de 250 mm de carrera, a una velocidad de carga constante y controlada de 0.8 kN/s durante todo el ensayo. De esta forma, el error máximo cometido al estimar el momento último, teniendo en cuenta que se toman al final de cada ensayo datos cada segundo o cada dos segundos, es de  $\pm 1.6$  kN para todas las vigas a partir de este ensayo. De esta forma tenemos acotado el error al estimar el momento flector, éste no supera  $\pm 5$  mkN.

Esta viga sufrió un accidente durante el montaje para su ensayo, cayó lateralmente y a consecuencia de la caída aparecieron fisuras de flexión. A causa de esto se pensó que la viga podría estar dañada, y que estos daños afectarían el resultado del ensayo. A fin de comprobar este punto, y además para poder probar el nuevo sistema de carga con un único gato, se decidió ensayar la viga hasta rotura.

Analizando el diagrama momento-flecha (Gráfica 10.6.1.3-1) observamos que el tramo cuasi-lineal finaliza para un momento aproximado de 90 a 110 mkN, momento de fisuración aparente. Este tramo presenta una ligera curvatura, probablemente debido al daño producido por la caída de la viga. El momento de rotura, de 294 mkN, se produce cuando el diagrama momento-flecha aún tiene una cierta pendiente.

En la Gráfica 10.6.1.3-2 se observa una simetría apreciable de la variación de deformación del pretensado durante el ensayo respecto a CL.

En la Gráfica 10.6.1.3-3 se aprecia el crecimiento de la variación de deformación en las galgas de hormigón situadas en la parte superior de la sección a la altura del pretensado superior, a 75 mm del paramento superior, durante el ensayo. La variación de deformación máxima registrada es de -1800 ue en centro luz, para la carga máxima.

En la Gráfica 10.6.1.3-4 se aprecia la variación de deformación del pretensado, respecto al momento flector en la zona central de la viga. Se aprecia que para los valores máximos de momento flector alcanzados, la pendiente de las curvas de las galgas centrales es pronunciada. Se observa que la galga 06, situada a 5500 mm del extremo de la viga, detectó el deslizamiento del pretensado, para un momento de 250 mkN y de 275 mkN. Tras el primer deslizamiento, se produjo una recuperación de deformación, con la misma pendiente aproximadamente que la que presentaba la curva antes del deslizamiento. Analizando la Gráfica 10.6.1.3-4 de variación de deformación del pretensado respecto a la distancia al extremo Sur se aprecia una variación de deformación máxima:

$$\Delta \epsilon_{p \max}^* = 2600 \text{ ue}$$

que posteriormente compararemos con la variación de deformación necesaria estimada para considerar el pretensado plastificado en zona central.

En la Gráfica 10.6.1.3-5 se aprecia variación de la deformación de las galgas de pretensado del extremo Sur, excepto en las más extremas. La variación de deformación de las galgas más próximas a los extremos es aproximadamente lineal con el momento flector máximo, sin que se aprecie deslizamiento de las mismas durante el ensayo.

Se aprecia la gran similitud entre el tramo inicial del diagrama momento-curvatura teórico y el obtenido experimentalmente (Gráficas 10.6.1.3-6 y 10.6.1.3-8). Sin embargo, el momento de fisuración aparente en las curvas es sensiblemente inferior al teórico, de 125 mkN. La curvatura máxima alcanzada experimentalmente es similar a la prevista en el diagrama teórico. En la Gráfica 10.6.1.3-7 se observa que el coeficiente R es elevado.

Si comparamos la variación de deformación del pretensado inferior teórica y experimental, se aprecia una cierta similitud entre el comportamiento de las galgas centrales 05 y 06 (Gráfica 10.6.1.3-4) y las gráficas teóricas (10.6.1.3-9), durante la primera parte del ensayo. Sin embargo los valores de deformación máxima registrados fueron menores que los teóricamente necesarios para la plastificación (que se produce para un momento de 263 mkN), de 4207 y 4285 respectivamente. La variación de deformación registrada en el pretensado es inferior a la necesaria para la plastificación.

No se apreció deslizamiento de pretensado a partir de la medida de ningún transductor.

Se aprecia un ligero deslizamiento del cordón de pretensado instrumentado, cordón 1, en el extremo Norte a 8550 mm del extremo Sur (Gráfica 10.6.1.3-10). Esto no implica que haya habido deslizamiento en el extremo de la viga. La disminución de

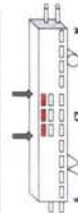
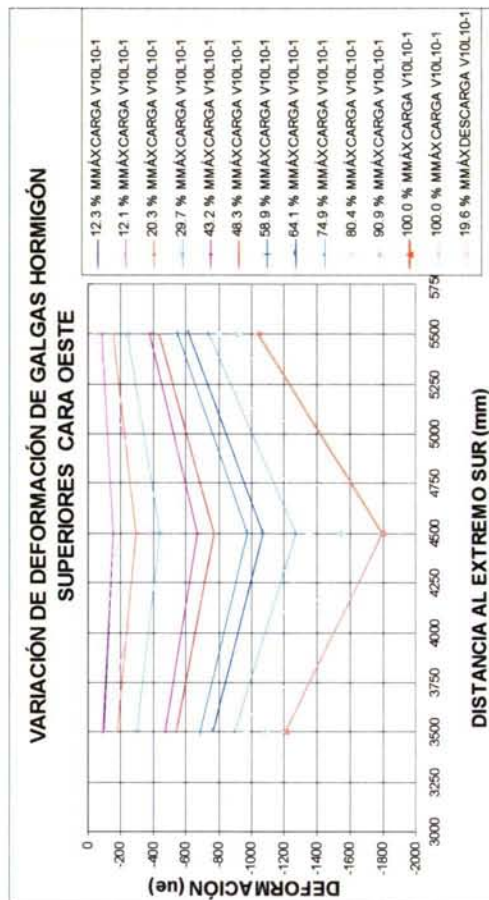


deformación del hormigón (descarga o compresión) indica deslizamiento en esa sección, de otro/otros cordones en la misma sección.

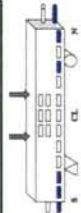
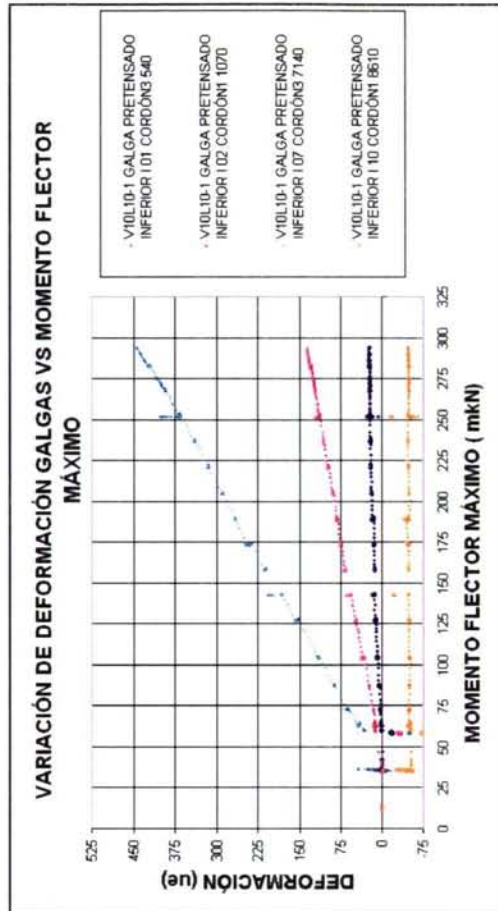
En la Gráfica 10.6.1.3-11 se observa la variación de deformación de la armadura de confinamiento durante el ensayo, variación superior en el interior de la viga. En la Gráfica 10.6.1.3-12 se aprecian la variación de deformación de las galgas adheridas en la armadura de confinamiento, que implican descarga de la armadura de confinamiento, a medida que aumenta el esfuerzo cortante en apoyo. Esto puede ser debido a un deslizamiento local del pretensado, que implica una pérdida de fuerza de pretensado, con la consiguiente reducción de las tensiones transversales.

La forma de rotura de la viga fue por agotamiento a compresión del hormigón, en la zona central, a 4.3 m del extremo Sur. También se produjo pandeo de las armaduras comprimidas y del cordón superior de pretensado tras la rotura.

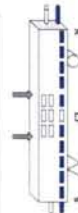
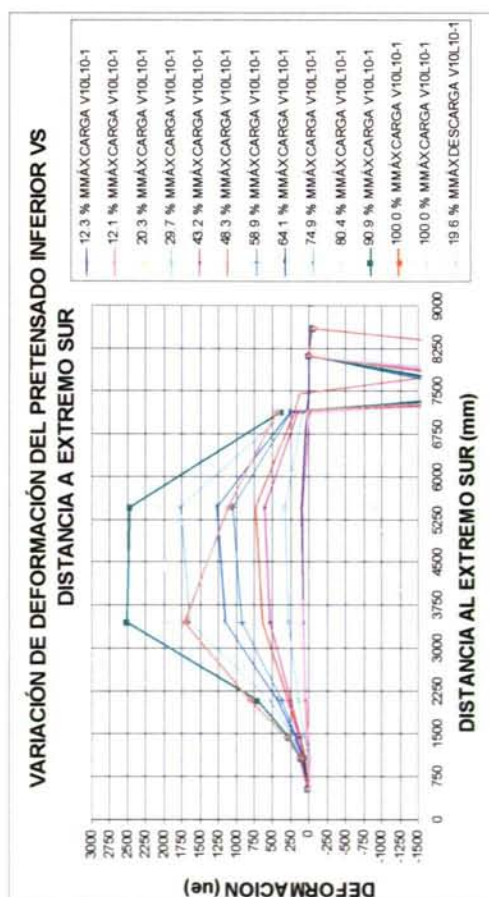
A pesar del accidente sufrido por la viga, el momento último es similar al de la primera viga ensayada, V6L10-1. A la vista de las gráficas adjuntas, no se aprecian diferencias de comportamiento con las vigas previamente ensayadas.



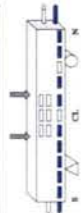
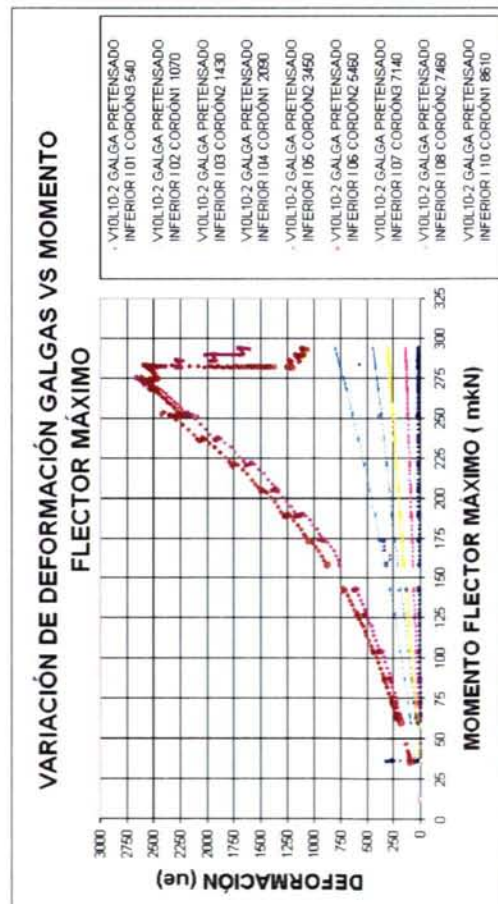
Gráfica 10.6.1.3-3



Gráfica 10.6.1.3-5

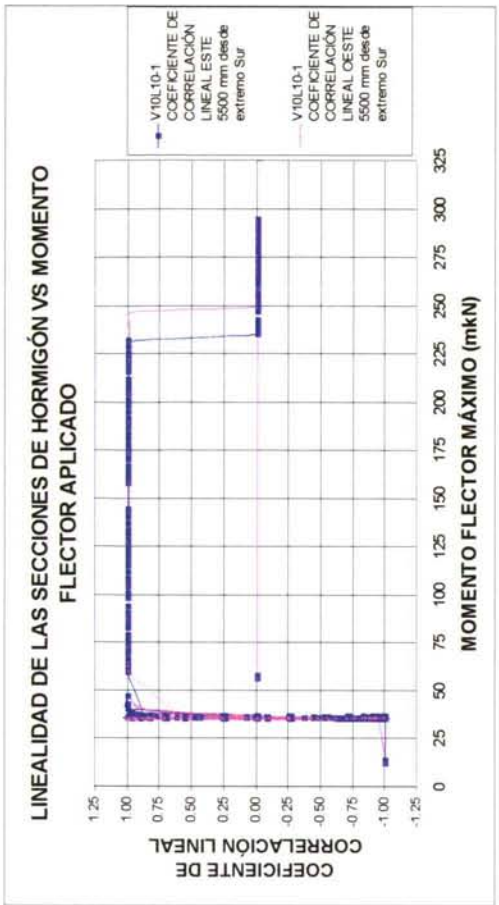


Gráfica 10.6.1.3-2

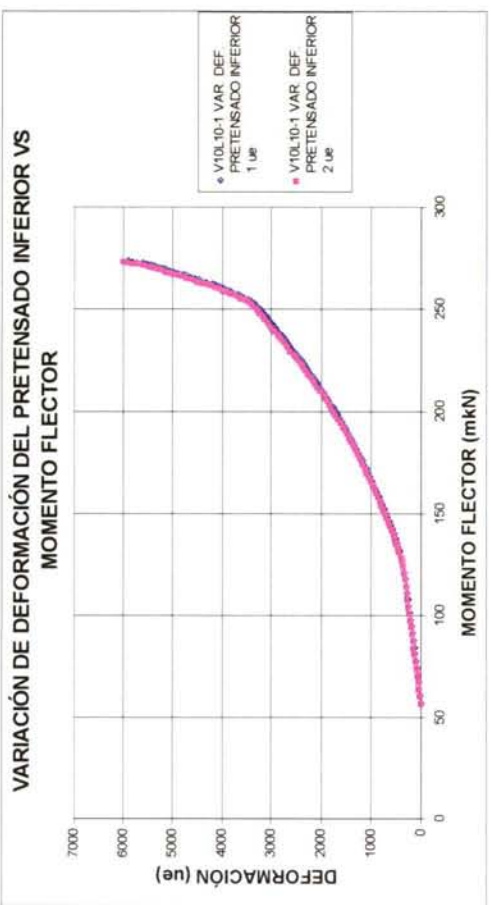


Gráfica 10.6.1.3-4

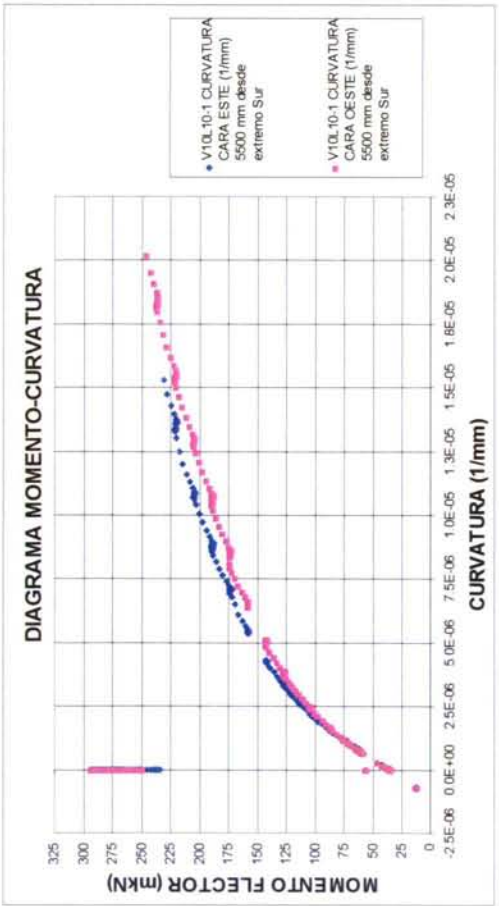
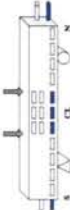




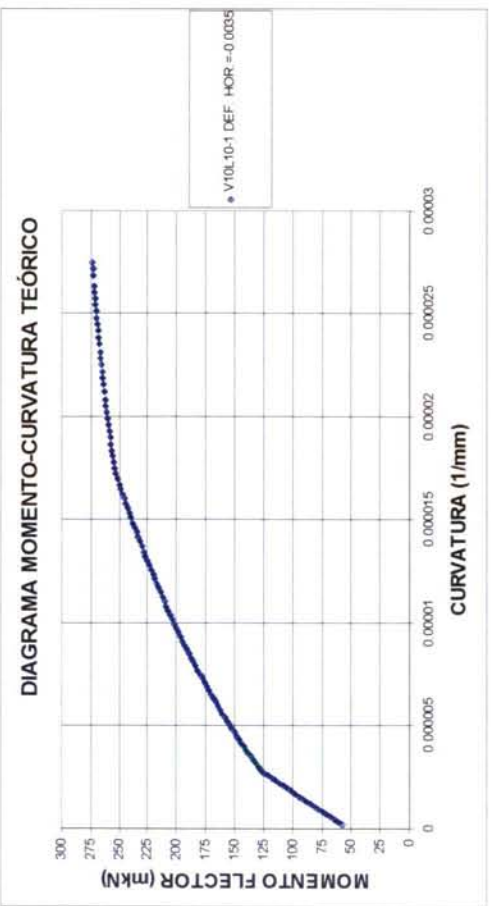
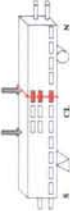
Gráfica 10.6.1.3-7



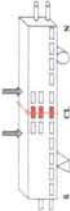
Gráfica 10.6.1.3-9

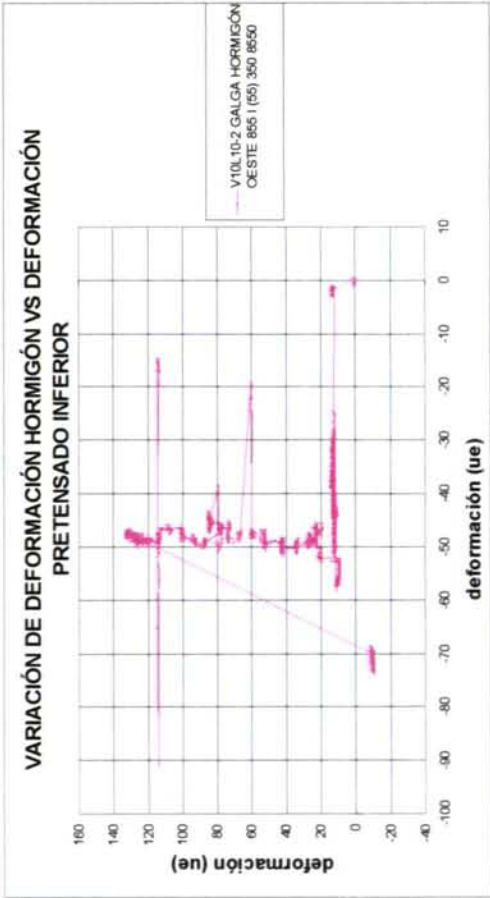


Gráfica 10.6.1.3-6

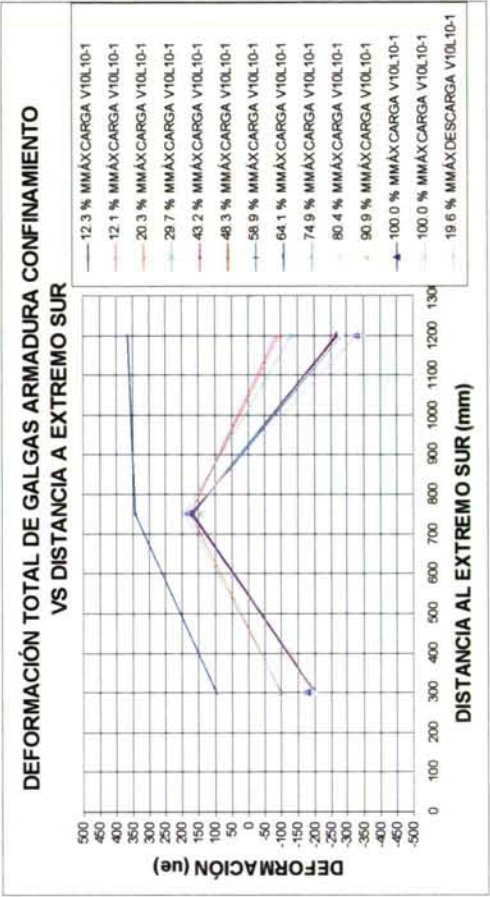
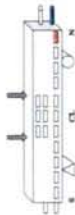


Gráfica 10.6.1.3-8

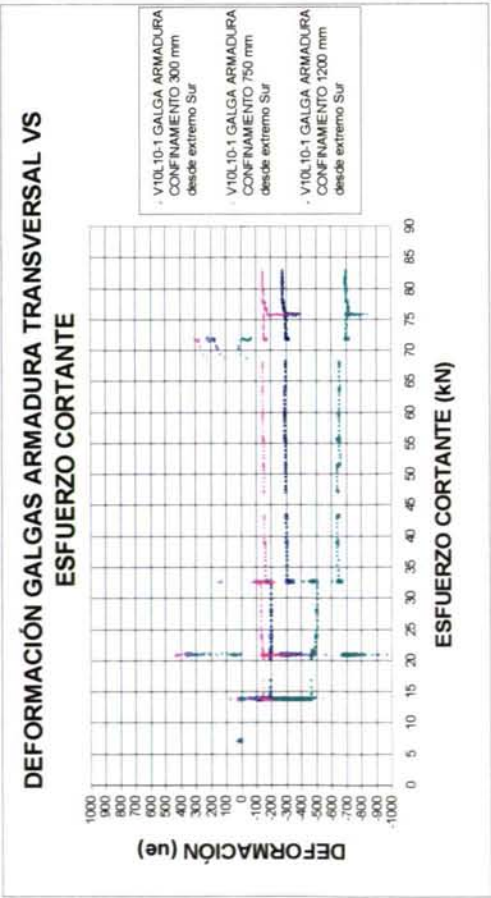
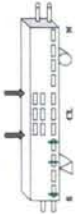




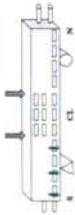
Gráfica 10.6.1.3-10



Gráfica 10.6.1.3-11



Gráfica 10.6.1.3-12

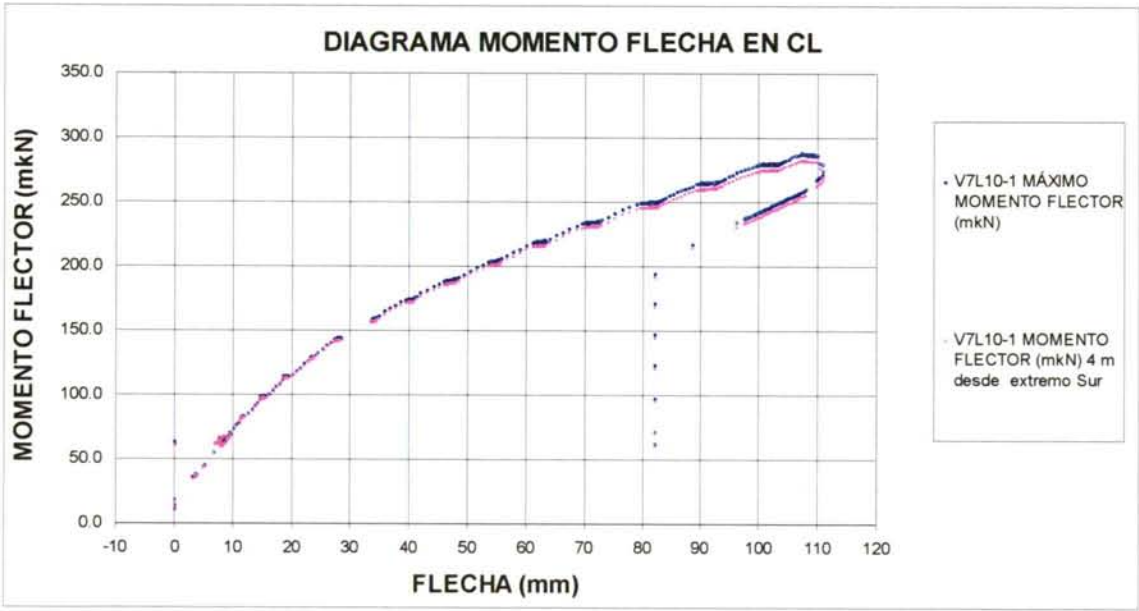




10.6.1.4. Viga V7L10-1

Tabla 10.6.1.4-1

Viga	V7L10-1	Máximo	Mínimo	Unidad
Peso viga		13.45		kN
Densidad		18.68		kN/m <sup>3</sup>
Armadura transversal	c 8 a 15			
Distancia desde extremos a cargas aplicadas		4.0		m
Máximo momento flector		287.6		mkN
Máximo reacción apoyo	Norte	84.7		kN
Máximo reacción apoyo	Sur	88.1		kN
Máx/min esfuerzo cortante zona central	4 m	-0.1	-11.6	kN
Máx/min esfuerzo cortante zona central	5 m	13.1	1.6	kN
Máxima flecha		110.9		mm
Tangente FI	(Ductilidad)	0.033		m/m



Gráfica 10.6.1.4-1

En este ensayo se emplearon relojes comparadores en tres cordones de pretensado, para detectar los posibles deslizamientos de los cordones de pretensado en extremos de viga.

En la Gráfica 10.6.1.4-1 se presenta el comportamiento del {momento flector en la zona central} respecto a la {flecha en CL}. Se aprecia que el tramo lineal inicial finaliza para un momento aproximado de 100 mkN, momento de fisuración aparente. Se observa que en los escalones de carga finales la flecha aumenta a pesar de que el momento permanece constante, debido a una posible plastificación del pretensado inferior en la zona central. Las primeras fisuras se detectaron durante el ensayo, para un momento comprendido entre 99 y 115 mkN.

En la Gráfica 10.6.1.4-2 se observa una simetría apreciable respecto a CL de la variación de deformación del pretensado a lo largo de la viga, a carga creciente, hasta el 90% de la carga máxima. A partir de entonces la variación de deformación es superior en el extremo Sur.

En la Gráfica 10.6.1.4-3 se aprecia el crecimiento de la variación de deformación de las galgas de hormigón situadas en la parte superior de la sección (a la altura del pretensado superior, a 75 mm del paramento superior), respecto a la distancia al extremo Sur. La deformación máxima registrada es de  $-2300$  ue en centro luz, para la carga máxima alcanzada.

En la Gráfica 10.6.1.4-4 se aprecia la variación de deformación del pretensado máxima respecto a la distancia al extremo Sur:

$$\Delta \varepsilon_{p, \max}^* = 3300 \text{ ue}$$

valor que posteriormente compararemos con la variación de deformación necesaria estimada para considerar el pretensado plastificado en zona central. Se detecta una mayor variación de deformación en el extremo Sur, aparentemente es el más cargado. Se observa el deslizamiento de galga central 06 Sur, para un momento flector de  $285$  mkN aproximadamente.

En la Gráfica 10.6.1.4-5 se aprecia la variación de la deformación de las galgas de pretensado de los extremos de la viga durante el ensayo, incluso en las galgas más extremas, lo que indica deslizamiento de los cordones instrumentados en las secciones instrumentadas. La variación de deformación de las galgas más próximas a los extremos es aproximadamente lineal con el momento flector actuante en la zona central.

En la Gráfica 10.6.1.4-6, en la que se reflejan los diagramas momento-curvatura en centro luz, se aprecia una gran similitud entre ambos. La fisuración se produce entre  $110$  y  $130$  mkN aproximadamente. No se dispone de la rama hasta rotura de ninguno de los diagramas debido a la rotura de la banda extensométrica inferior. El coeficiente  $R$  es elevado, en valor absoluto (Gráfica 10.6.1.4-7). El cambio de valor, de  $-1$  a  $1$  se debe al cambio de curvatura de la viga registrado por las galgas, cuando se elimina la contraflecha de la viga, lo que se produce para un momento de  $65$  mkN.

Se aprecia la gran similitud entre el tramo inicial del diagrama momento-curvatura teórico y el obtenido experimentalmente (Gráficas 10.6.1.4-6 y 10.6.1.4-8). Sin embargo, el momento de fisuración aparente en las curvas experimentales, de  $110$ - $130$  mkN, es sensiblemente inferior al aparente de la curva teórica, de  $140$  mkN. No se dispone del tramo final del diagrama momento-curvatura experimental, por encima de  $200$  mkN, debido al fallo de las galgas de deformación traccionadas. La curvatura máxima detectada experimentalmente es superior a la prevista para el mismo momento actuante. La linealidad de las secciones centrales instrumentadas se evalúa a partir del coeficiente  $R$  (Gráfica 10.6.1.4-7).

Por lo que respecta a la variación de deformación del pretensado respecto al momento flector en la zona central, evaluada de forma teórica y experimental, ambas curvas son sensiblemente iguales hasta los  $250$  mkN (Gráficas 10.6.1.4-4 y 10.6.1.4-9). La deformación máxima experimental de las galgas centrales es inferior a la teóricamente necesaria para que se produzca la plastificación, de  $4048$  y  $4123$  ue respectivamente. El momento de plastificación teórico es de  $262$  mkN.



No se detectó deslizamiento en ninguno de los transductores de desplazamiento, sin embargo se detectaron deslizamientos de dos cordones del extremo Sur, como se puede apreciar en la Tabla 10.6.1.4-2.

Tabla 10.6.1.4-2

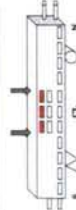
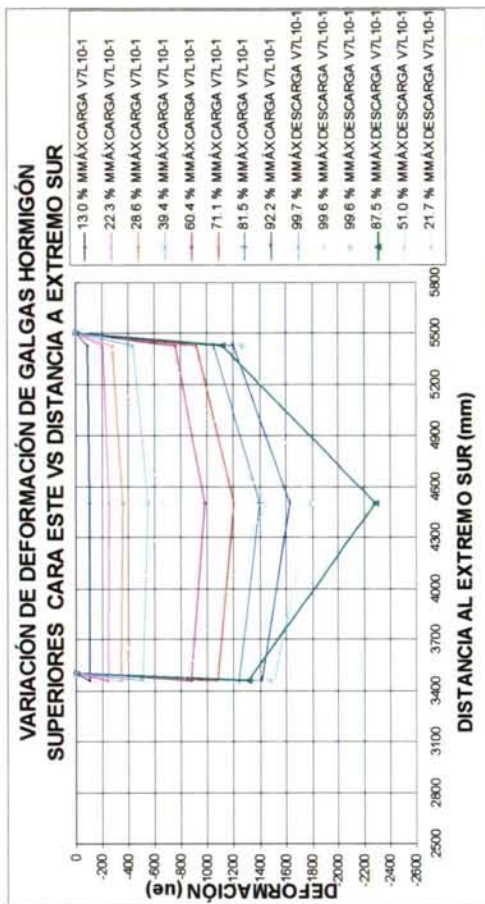
Viga	Fecha de ensayo	Extremo viga	Cordón	Deslizamiento inicial	Momento deslizamiento inicial	Deslizamiento final	Precisión reloj	Diagnóstico
V7L10-1		Sur	2			0	0.001	No detectado deslizamiento
		Norte	3	0.01	163	0.03	0.01	Deslizamiento
		Norte	1	0.01	225	0.01	0.01	Deslizamiento

La forma de rotura de la viga fue por agotamiento a compresión del hormigón, en la zona central. También se produjo pandeo de las armaduras comprimidas y del cordón superior de pretensado tras la rotura.

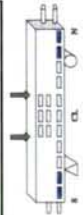
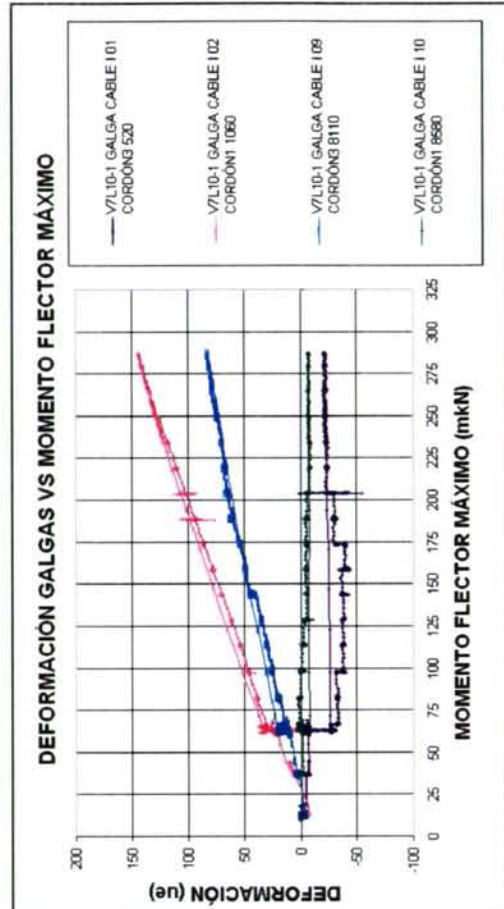
En la Gráfica 10.6.1.4-10 se aprecia la variación de deformación de las galgas de la armadura de confinamiento. Se aprecia que la deformación disminuye a lo largo del ensayo, en las galgas situadas a la derecha del apoyo de la viga. Esto puede ser debido al efecto arco, producido por las isostáticas de compresiones de los apoyos. Estas galgas están próximas a los apoyos, a menos de un canto y medio del mismo.

La variación de deformación de las galgas de armadura de confinamiento respecto al esfuerzo cortante es escasa (Gráfica 10.6.1.4-11).

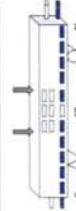
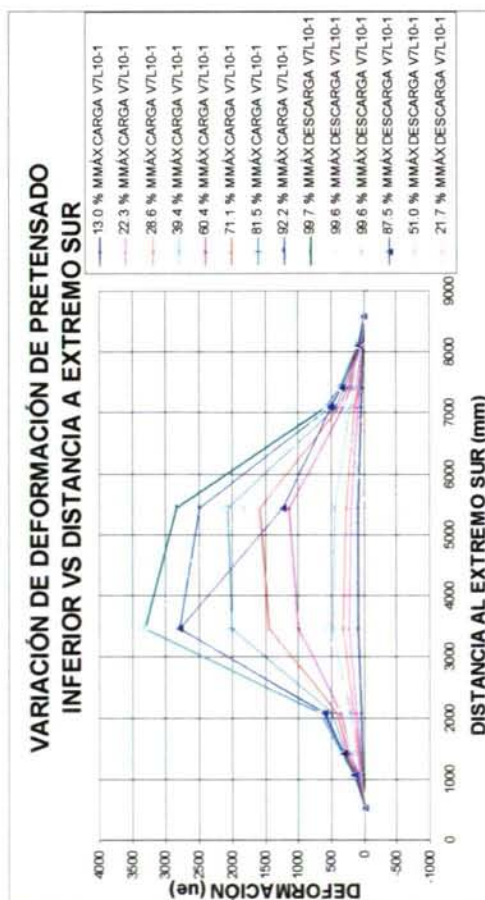
A pesar de que esta viga tiene armadura de confinamiento máxima, el momento último registrado es reducido. Esto puede estar motivado por la edad de ensayo de la viga, de 10 meses. En este tiempo las pérdidas de pretensado por hendimiento podrían haberse generalizado a toda la viga.



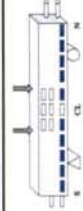
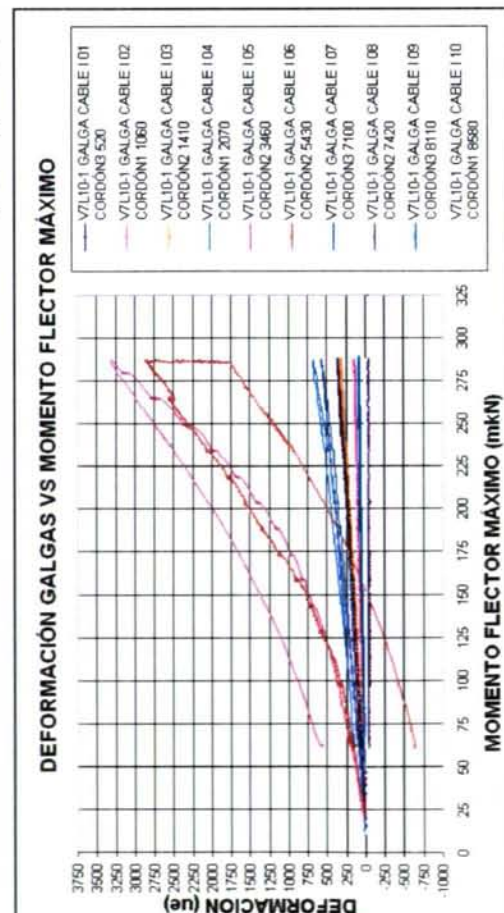
Gráfica 10.6.1.4-3



Gráfica 10.6.1.4-5

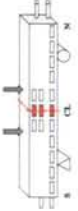
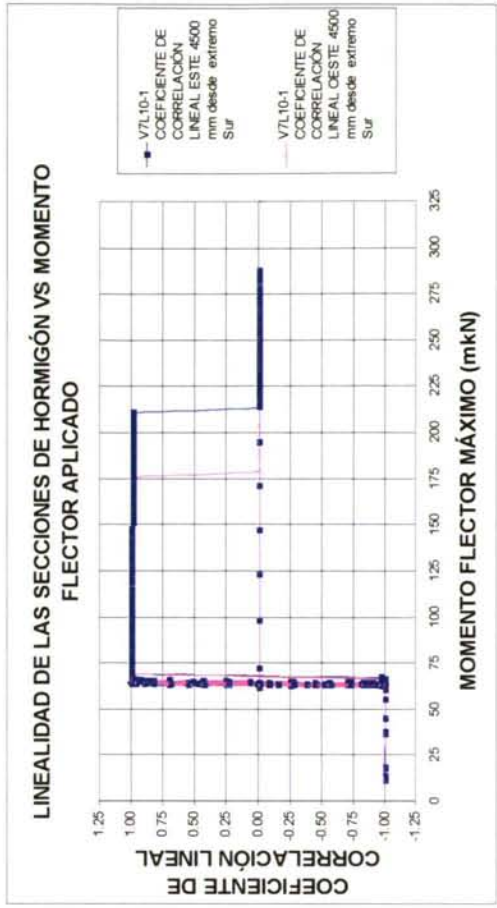


Gráfica 10.6.1.4-2

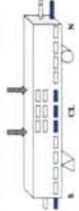
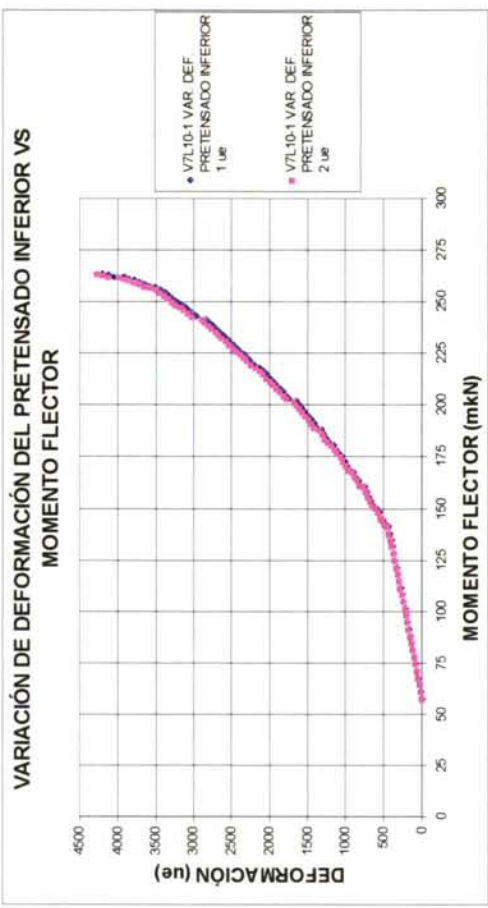


Gráfica 10.6.1.4-4

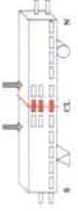
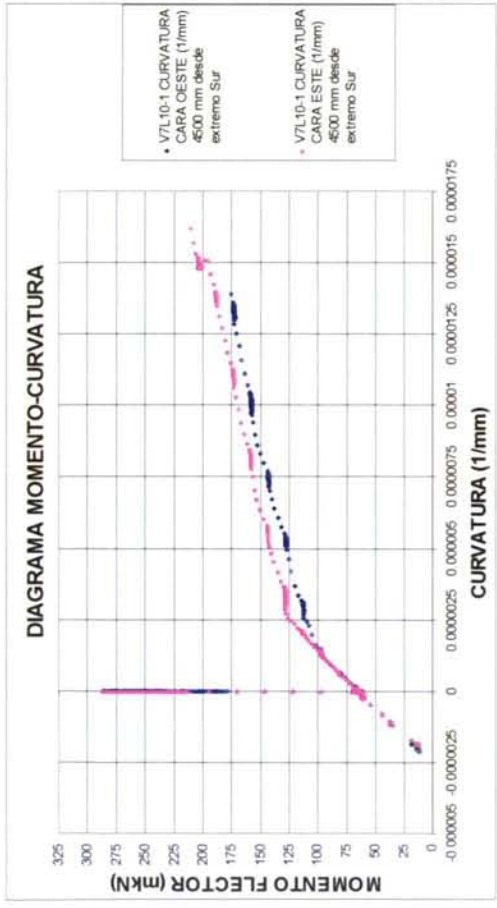




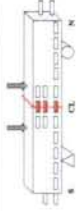
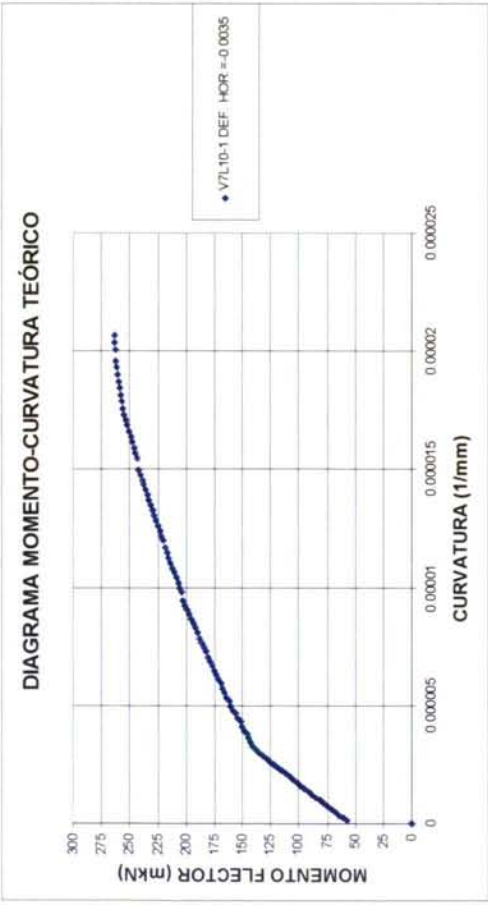
Gráfica 10.6.1.4-7



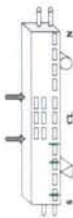
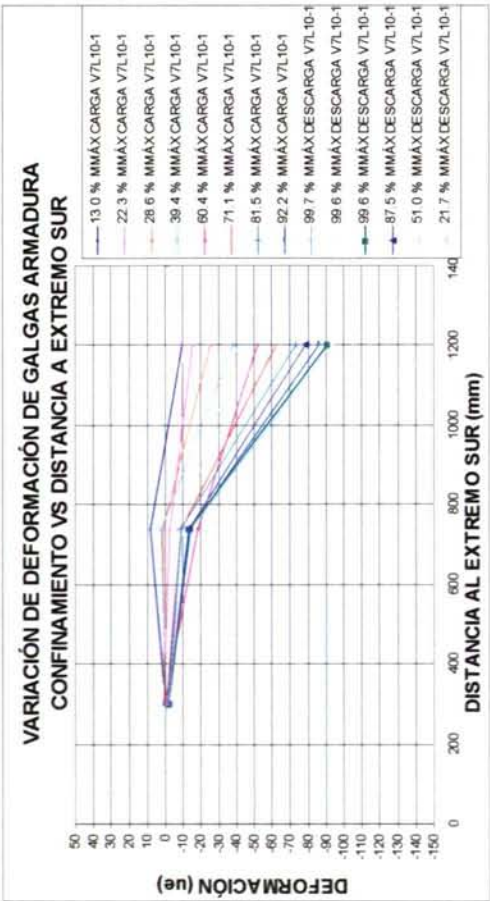
Gráfica 10.6.1.4-9



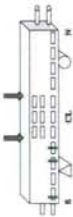
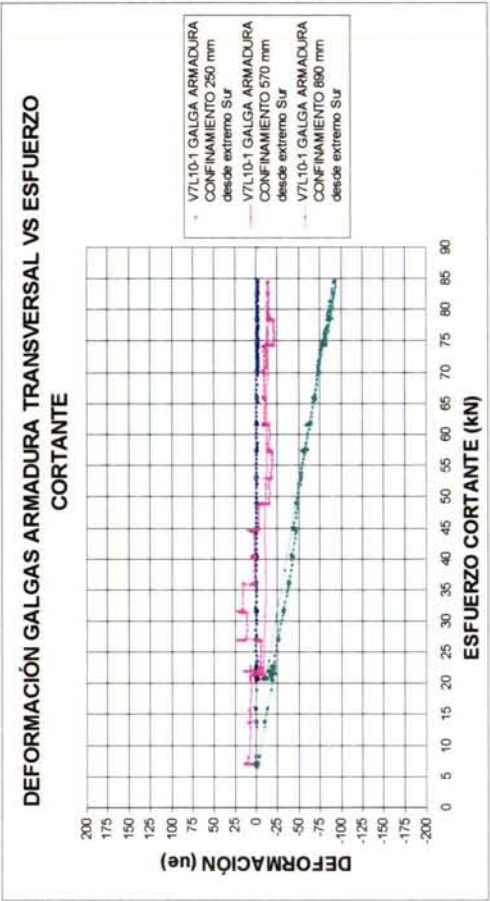
Gráfica 10.6.1.4-6



Gráfica 10.6.1.4-8



Gráfica 10.6.1.4-10



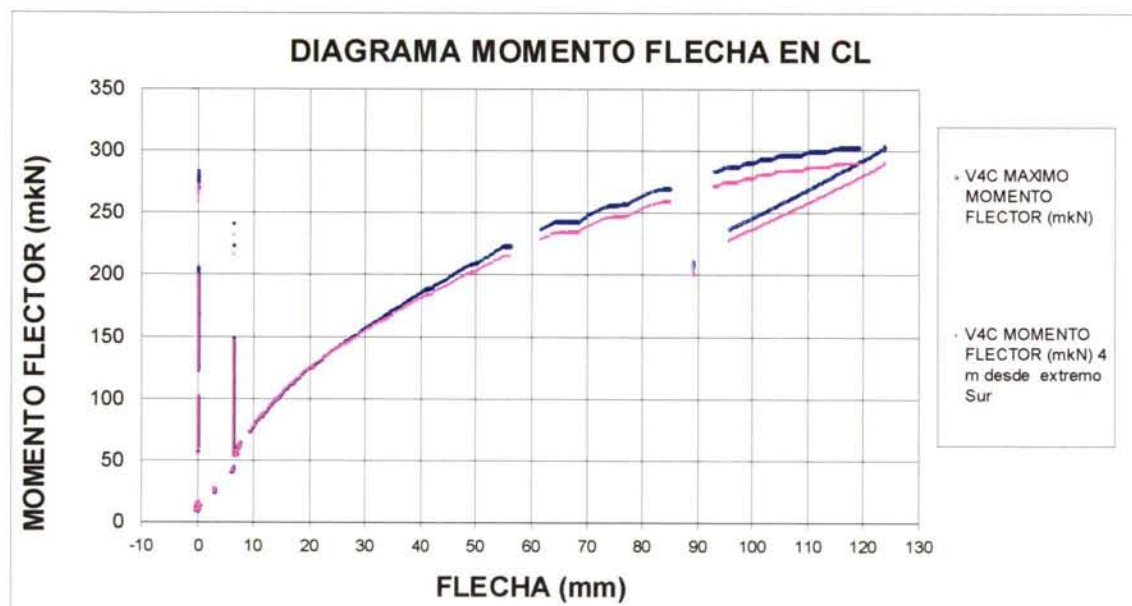
Gráfica 10.6.1.4-11



### 10.6.1.5. Viga V4C

Tabla 10.6.1.5-1

Viga	V4C			
Peso viga		18.74		kN
Densidad		26.0		kN/m <sup>3</sup>
Armadura transversal	c 8 a 15			
Distancia desde extremos a cargas aplicadas		3.5		m
Máximo momento flector		303.8		mkN
Máximo reacción apoyo	Norte	99.2		kN
Máximo reacción apoyo	Sur	109.2		kN
Máx/min esfuerzo cortante zona central	3.5 m	5.3	-12.6	kN
Máx/min esfuerzo cortante zona central	5.5 m	16.7	-1.2	kN
Máxima flecha		123.8		mm
Tangente FI	(Ductilidad)	0.043		m/m



Gráfica 10.6.1.5-1

Se decidió ensayar esta viga con carga simétrica situada a 3.5 metros desde ambos extremos. De esta forma, si la rotura que se producía era dúctil sin deslizamiento, se ensayaría la siguiente viga de hormigón convencional a una distancia menor desde los extremos, buscando acotar superiormente la longitud de anclaje.

Para este material la bibliografía proporciona resultados de otros investigadores (WEER91, COUS86, CHON91, ...). La longitud de anclaje de este material es conocida, al contrario de lo que sucede con el hormigón ligero.

Esta viga, tal y como aparece en el diagrama del momento flector respecto a la flecha en CL (Gráfica 10.6.1.5-1), debido a un fallo del control del sistema hidráulico sufrió una sobrecarga considerable accidental antes de comenzar el ensayo, debido a lo cual aparecieron grandes fisuras de flexión.

Las fisuras alcanzaron los 23 centímetros en ambos paramentos laterales. Sin embargo, no se detectó deslizamiento del pretensado tras la sobrecarga, por lo que se decidió

realizar el ensayo hasta rotura, tal y como estaba programado. Es de destacar que las fisuras aparecidas durante la sobrecarga se cerraron completamente al descargar la viga, siendo apenas visibles (ancho de fisuras menor de 0.05 mm tras descarga).

Debido a la sobrecarga el tramo inicial del diagrama momento-flecha en CL no es lineal, puesto que la viga ya estaba fisurada (Gráfica 10.6.1.5-1). Se aprecia que el tramo final de la curva es prácticamente horizontal, indicio de plastificación probable del pretensado inferior. Se aprecia además que en los escalones de carga finales la deformación aumenta a pesar de que el momento permanece constante. La rama de descarga registrada es muy lineal.

En la Gráfica 10.6.1.5-2 se observa la variación de la deformación del pretensado respecto a la distancia al extremo Sur, para diversos momentos durante el ensayo. Se observa que una gran simetría respecto a CL, hasta el 80% del momento máximo. A partir de ese valor, aumenta la deformación en el extremo Norte, aparentemente el más cargado.

Analizando la gráfica de variación de deformación del pretensado respecto al momento flector (Gráfica 10.6.1.5-4) se aprecia una variación de deformación máxima:

$$\Delta \varepsilon_{p \text{ máx}}^* = 5500 \text{ ue}$$

que posteriormente compararemos con la variación de deformación necesaria estimada para considerar el pretensado plastificado en zona central. La pendiente de la curva de las galgas centrales es muy elevada al final del ensayo, en prerrotura, lo que parece indicar plastificación del pretensado. Se aprecia el deslizamiento de galga de pretensado 06 para un momento de 280 mkN aproximadamente. La variación de deformación del pretensado es superior en el extremo Norte, aparentemente el más cargado.

En la Gráfica 10.6.1.5-3 se aprecia el crecimiento de los valores de la deformación en las galgas de hormigón situadas en la parte superior de la sección (a la altura del pretensado superior, a 75 mm del paramento superior). La deformación máxima registrada es de -1400 ue en centro luz, para la carga máxima.

Se aprecia variación de la deformación de las galgas de pretensado de ambos extremos, excepto las más exteriores, galgas 01 y 10 (Gráfica 10.6.1.5-5). Las galgas de pretensado de los extremos no experimentan apenas variación de deformación, lo que indica que estos cordones de pretensado no deslizaron. En la misma gráfica se observa que las galgas de la zona de transmisión ven incrementada su deformación, siguiendo una ley aproximadamente lineal.

En esta viga no se dispone del diagrama momento-curvatura propiamente dicho, debido a la sobrecarga accidental durante el inicio del ensayo (Gráfica 10.6.1.5-6). Sin embargo, podemos comparar los valores de momento flector último experimental y teórico (Gráfica 10.6.1.5-8). A pesar de esto, la linealidad de las secciones durante el ensayo fue elevada (Gráfica 10.6.1.5-7). El momento flector último teórico previsto era de 289 mkN, valor que fue superado por la viga. La viga no rompió, debido a deformación excesiva, pero su momento máximo alcanzó los 304 mkN, lo que supone un 5% más que el valor previsto. Esto puede ser debido a que la resistencia a



compresión del hormigón en la viga puede ser superior al valor estimado a partir de la resistencia de probetas cilíndricas (condicionadas por su esbeltez).

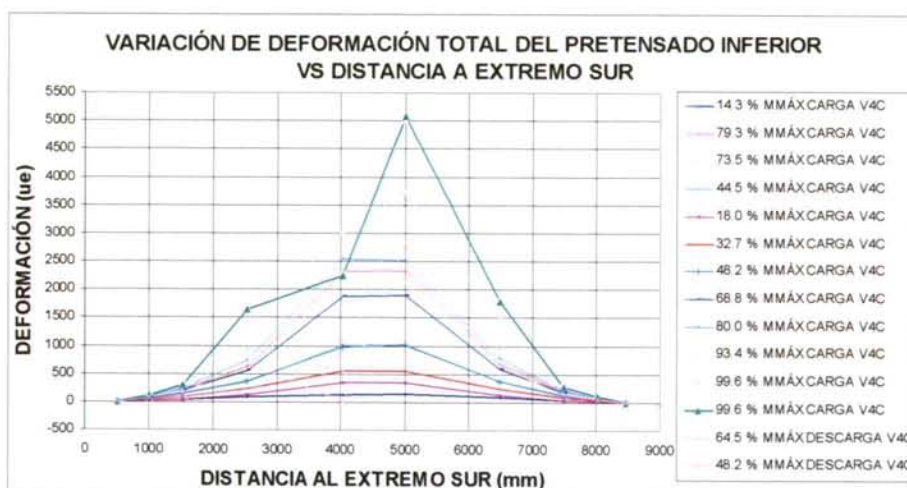
Por lo que respecta a la variación de deformación del pretensado, la teórica y la experimental son sensiblemente iguales hasta los 250 mkN (Gráficas 10.6.1.5-4 y 10.6.1.5-9). La variación de deformación máxima registrada en las galgas centrales es elevada, superior a la variación de deformación prevista para plastificación (de 3662 y 3730 ue en ambas aproximaciones). El momento de plastificación teórico es de 267 mkN.

Se apreció un ligero deslizamiento del pretensado en el extremo Norte, cordón central, a partir de 250 mkN, que alcanza 0.003 mm (Gráfica 10.6.1.5-10). El resto de los transductores no detectaron deslizamiento alguno.

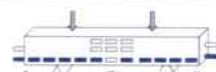
La viga no llegó a romper porque se alcanzó una deformación excesiva. Cuando la viga amenazaba tocar a la viga de reparto en los extremos se descargó para evitar la alteración del esquema estático del ensayo. Tras la descarga se produjo una recuperación de la flecha considerable, y se cerraron las fisuras abiertas, de lo que se deduce que el pretensado continuaba anclado.

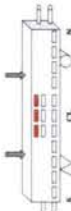
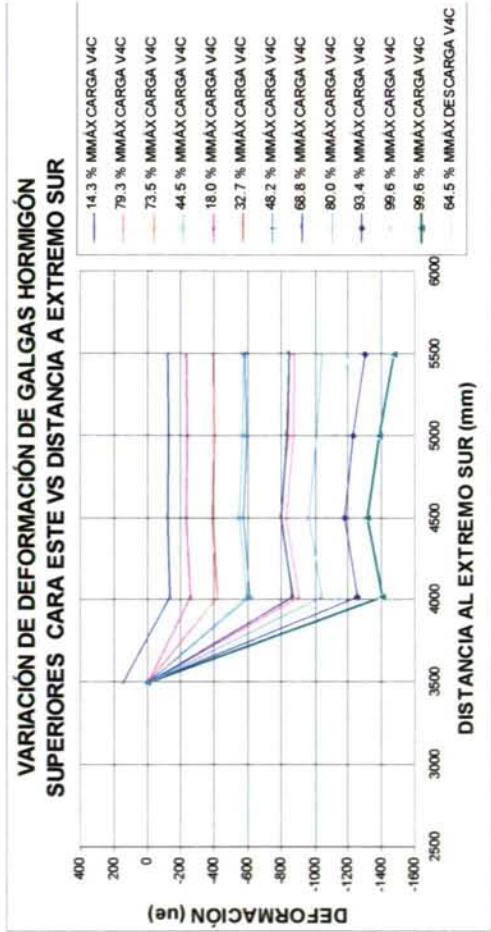
La armadura de confinamiento no experimenta variación de tensión apreciable durante el ensayo (Gráficas 10.6.1.5-12 y 10.6.1.5-14).

Se aprecia variación de deformación apreciable de la galga adherida a la armadura de cortante a 2000 mm del extremo Sur (Gráficas 10.6.1.5-11 y 10.6.1.5-13), lo que supone, considerando un módulo de deformación de 200000 MPa, una variación de 200 MPa aproximadamente. En esa zona, como se aprecia en el mapa de fisuras correspondiente, en el Anexo 6, no se produjo fisuración de cortante.

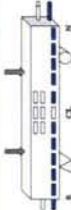
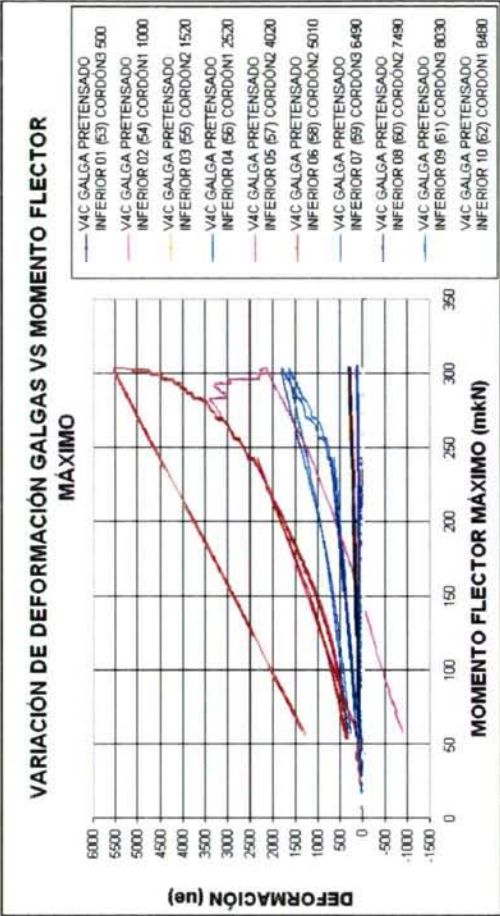


Gráfica 10.6.1.5-2

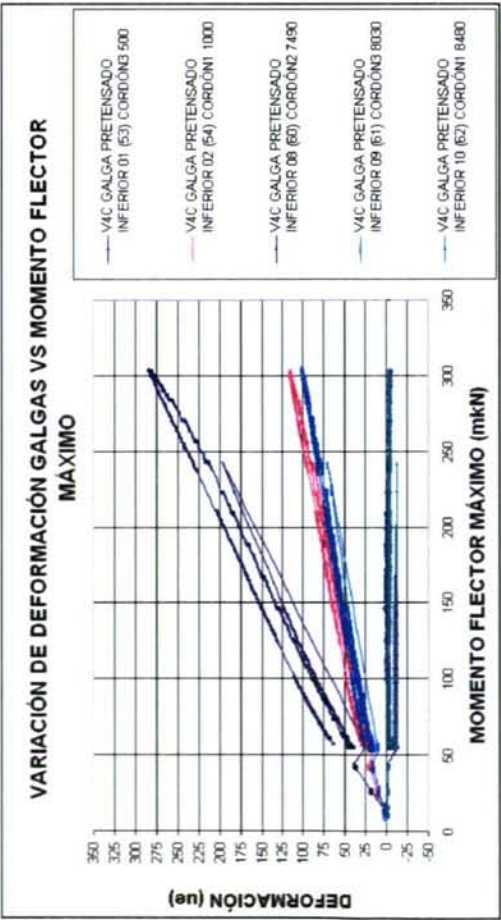




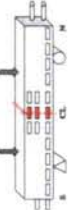
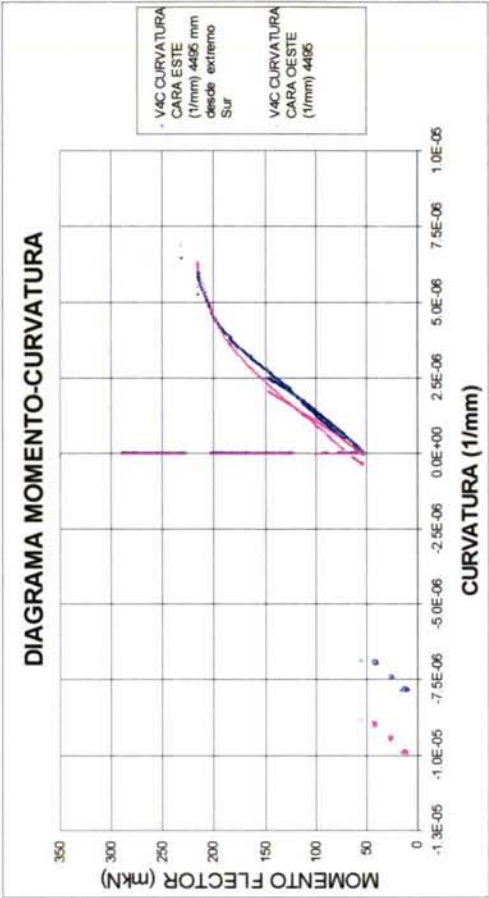
Gráfica 10.6.1.5-3



Gráfica 10.6.1.5-4

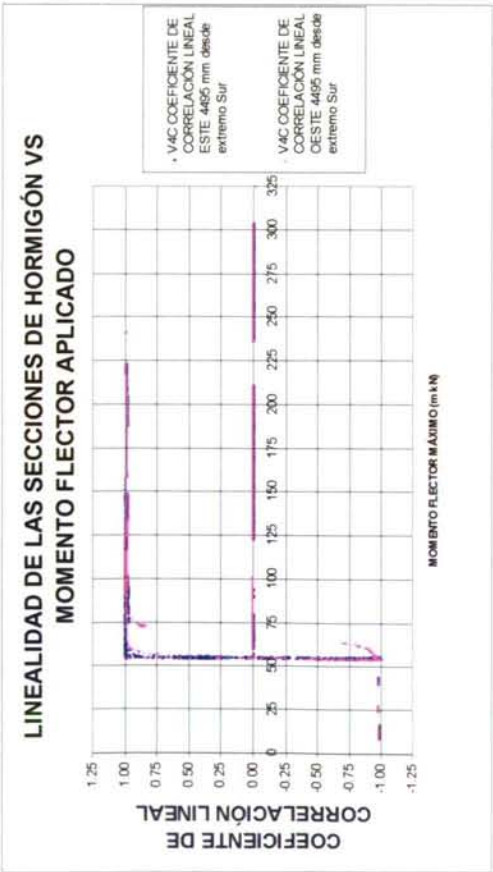


Gráfica 10.6.1.5-5

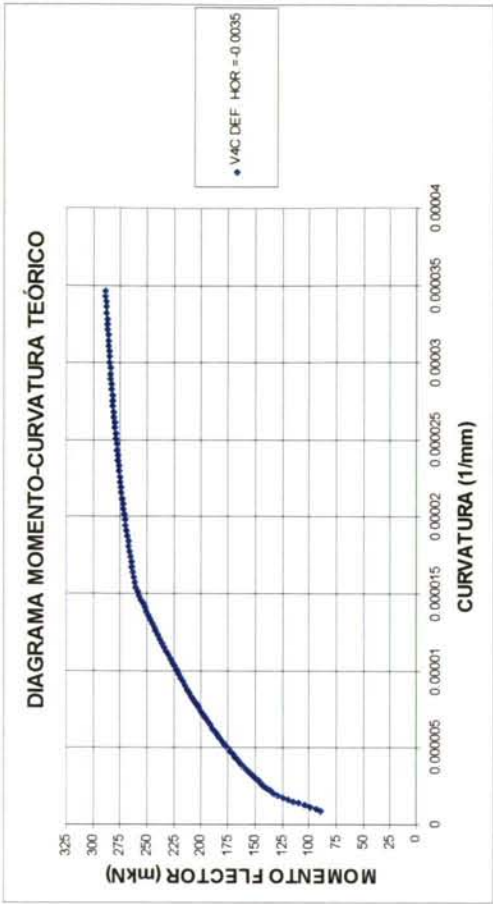


Gráfica 10.6.1.5-6

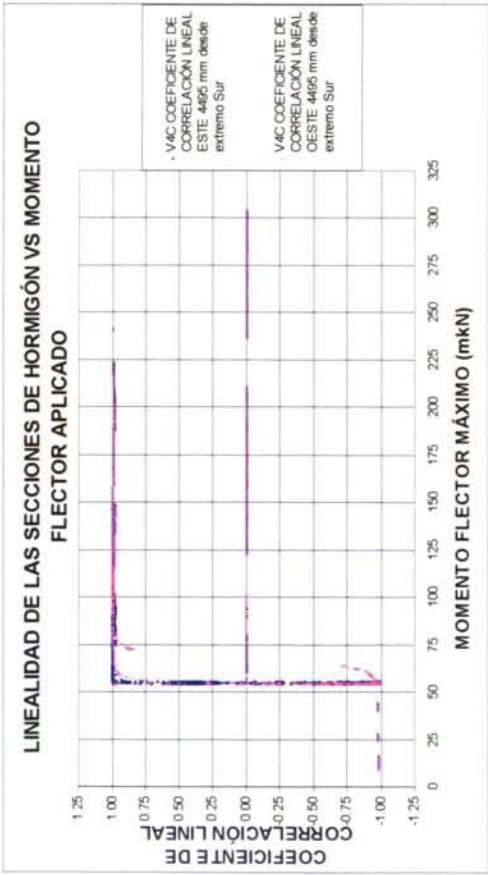




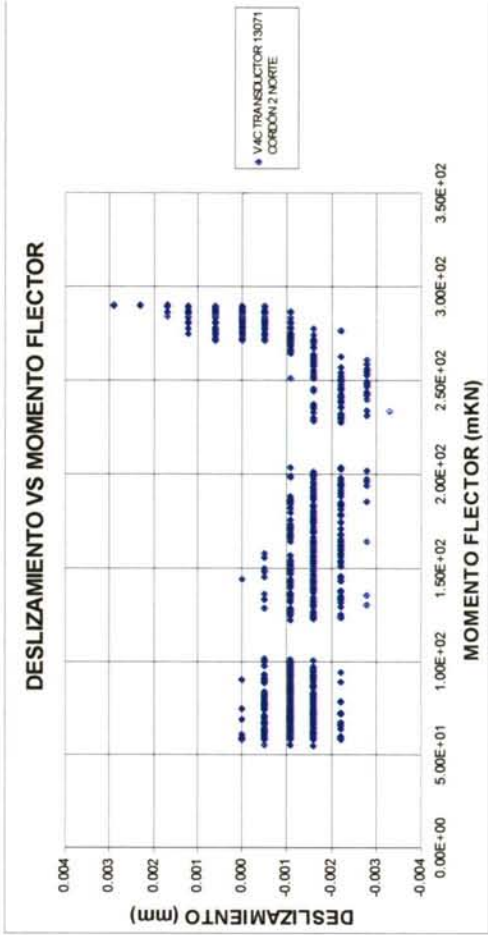
Gráfica 10.6.1.5-7



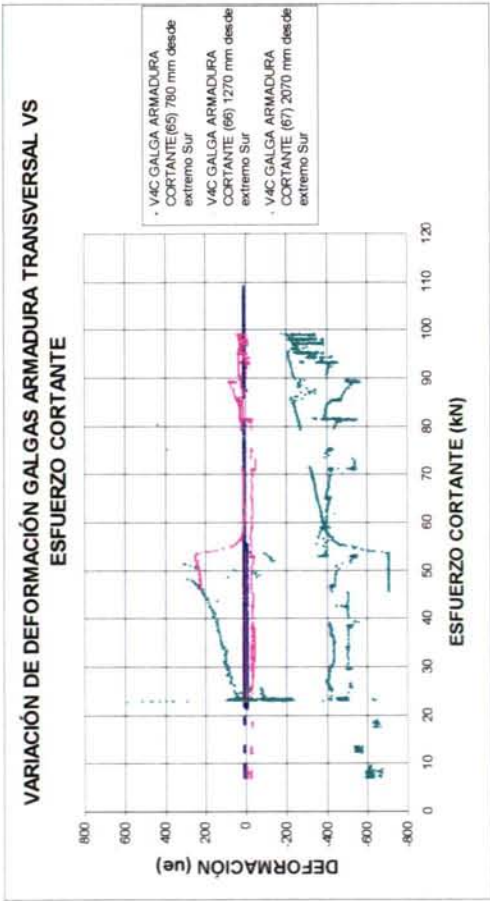
Gráfica 10.6.1.5-8



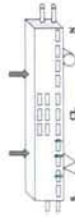
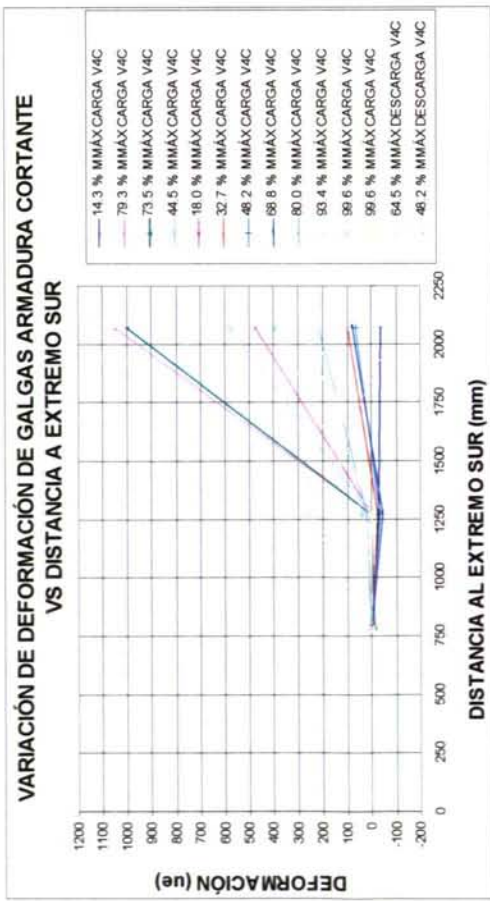
Gráfica 10.6.1.5-9



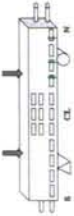
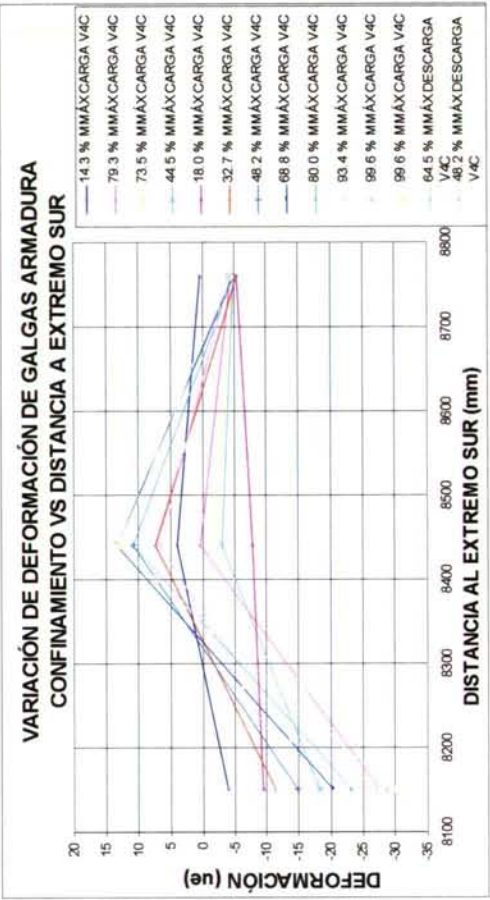
Gráfica 10.6.1.5-10



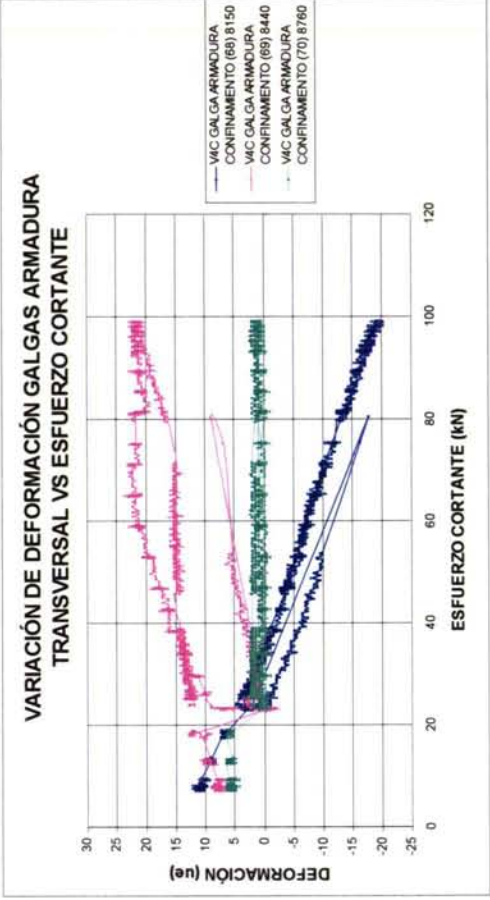
Gráfica 10.6.1.5-11



Gráfica 10.6.1.5-13



Gráfica 10.6.1.5-12



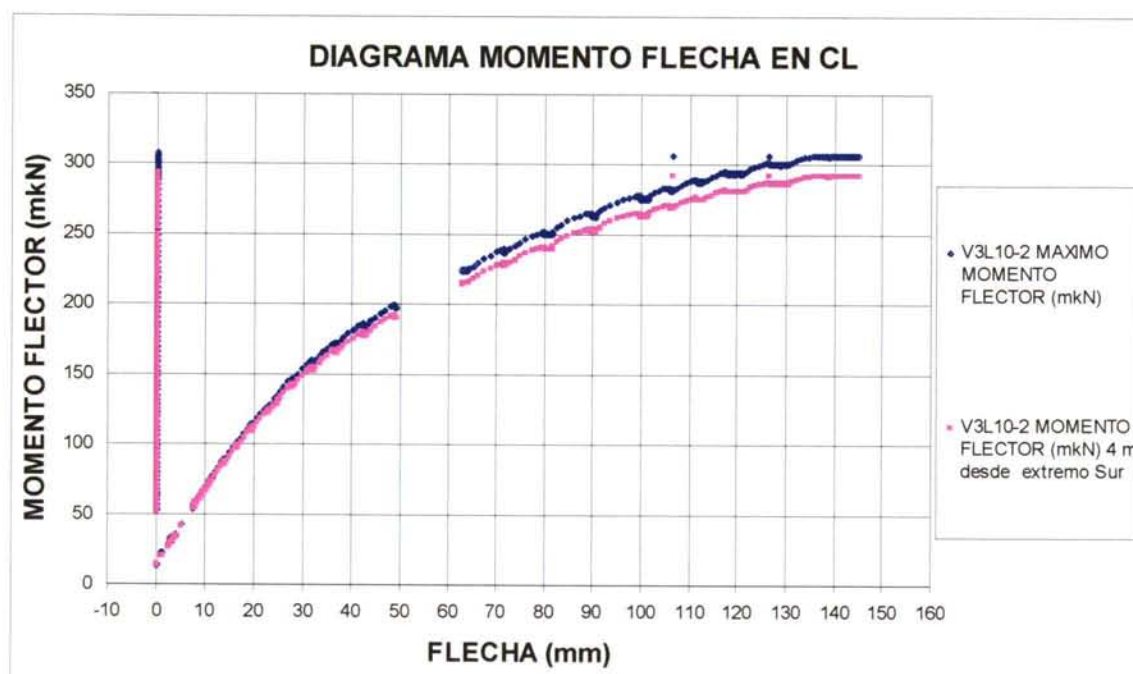
Gráfica 10.6.1.5-14



## 10.6.1.6. Viga V3L10-2

Tabla 10.6.1.6-1

Viga	V3L10-2			
Peso viga		16,5		kN
Densidad				kN/m <sup>3</sup>
Armadura transversal	c 8 a 15			
Distancia desde extremos a cargas aplicadas		3,5		m
Máximo momento flector		307,3		mkN
Máximo reacción apoyo	Norte	99,3		kN
Máximo reacción apoyo	Sur	109,8		kN
Máx/min esfuerzo cortante zona central	3,5 m	3,2	-13,8	kN
Máx/min esfuerzo cortante zona central	5,5 m	17,5	0,4	kN
Máxima flecha		145,0		mm
Tangente FI	(Ductilidad)	0,050		m/m



Gráfica 10.6.1.6-1

Esta viga, al igual que el resto de las vigas de hormigón ligero HL10-2 presentó fisuración por hendimiento en la cara inferior, generalizada a toda su longitud.

Se decidió ensayar esta viga con las dos cargas simétricas aplicadas a 3,5 metros de los extremos de la viga. En caso de que la rotura de la viga se produjese por adherencia, la siguiente viga se ensayaría con las cargas aplicadas a 4 metros de los extremos, al igual que los ensayos de las vigas de HL10-1. Si, por el contrario, la rotura se producía por flexión con plastificación del pretensado se concluiría que, a pesar de la fisuración por hendimiento, el pretensado se encuentra anclado a 3,5 metros desde los extremos. De esta forma, se podría ensayar la viga siguiente a una distancia menor, que habría que estimar con los resultados proporcionados por los ensayos de pórtico LC (véase el Capítulo 6).

En la Gráfica 10.6.1.6-1 se observa que se mantiene la linealidad del diagrama {momento flector}-{flecha en centro luz} hasta un momento flector de 120 mkN aproximadamente, momento de fisuración aparente. Se aprecia que el tramo final de la curva es prácticamente horizontal, indicio de plastificación probable del pretensado inferior. La rama de descarga es muy lineal. Las primeras fisuras fueron detectadas visualmente para un momento flector comprendido entre 119 y 133 mkN.

Analizando la Gráfica 10.6.1.6-2, {variación de deformación del pretensado} respecto a la {distancia al extremo Sur} se aprecia una variación de deformación máxima:

$$\Delta \varepsilon_{p \text{ máx}}^* = 7500 \text{ ue}$$

a 4 m del apoyo Sur, valor que posteriormente compararemos con la variación de deformación necesaria estimada para considerar el pretensado plastificado en zona central.

Analizando la {variación de deformación del pretensado inferior} respecto al {momento flector máximo} (Gráfica 10.6.1.6-4), se observa que en las galgas centrales la pendiente es muy elevada al final del ensayo, lo que parece indicar plastificación del pretensado. Ninguna de las galgas presenta deslizamiento durante el ensayo. Se observa la linealidad del comportamiento durante la descarga, que finaliza con una deformación remanente de 2500 ue para la galga GC 05, valor que indica plastificación del pretensado inferior durante el ensayo.

En la Gráfica 10.6.1.6-3 se aprecia el crecimiento de los valores de la deformación en las galgas de hormigón situadas en la parte superior de la sección (a la altura del pretensado superior, a 75 mm del paramento superior). La deformación máxima registrada es de -1600 ue en centro luz, para la carga máxima.

No se detecta deslizamiento a partir del comportamiento deformacional de ninguna galga de pretensado (Gráfica 10.6.1.6-5). Se detecta una mayor variación de deformación en el extremo Sur, aparentemente es el más cargado. Se aprecia variación de la deformación de las galgas de pretensado de ambos extremos, excepto las más exteriores, galgas 01 y 10. Las galgas de la zona de transmisión ven incrementada su deformación, siguiendo una ley aproximadamente lineal hasta los 1500 mm desde ambos extremos. La galga 09 presenta un comportamiento inicial irregular debido a un fallo de conexión inicial, que se corrigió posteriormente. Las galgas de pretensado de los extremos experimentan variaciones de deformación superiores a las que presentaba la viga V4C (Apartado 10.6.1.5). La rama de descarga de las galgas extensométricas es prácticamente lineal, con una cierta deformación remanente.

Analizando los diagramas momento-curvatura de centro luz en ambas caras (Gráfica 10.6.1.6-6) se aprecia una gran similitud entre ambos, aunque la curvatura alcanzada es superior en la cara Oeste. Se aprecia en uno de ellos un escalón de cedencia, debido a la fisuración a través de la banda inferior. El momento de fisuración aparente es de 115 y 170 mkN en la cara oeste y este respectivamente. Se aprecia que, cuando se produce la fisuración aparente de la cara oeste, curiosamente aumenta la rigidez del diagrama de la cara este, hasta el momento de fisuración. Se dispone de la rama hasta rotura de ambos diagramas, por lo que se aprecia la horizontalidad del tramo final. El comportamiento en descarga presenta una singularidad: la pendiente, hasta que se cierran las fisuras es



similar a la rama fisurada en carga, tras lo cual se aprecia una pendiente superior a la de la fase no fisurada en carga. Por lo que respecta al coeficiente  $R$ , éste es elevado (véase la Gráfica 10.6.1.6-7). El cambio del mismo de  $-1$  a  $1$  se debe al cambio de curvatura de la viga, respecto al inicio del ensayo, y se produce para un momento de  $60 \text{ mkN}$ .

Los diagramas momento-curvatura experimentales (Gráfica 10.6.1.5-6) difieren del teórico (Gráfica 10.6.1.5-8) en el valor del momento de fisuración aparente. Los valores de curvatura máxima son similares en ambos diagramas, teórico y experimental. El momento último predicho es inferior al real en un  $9\%$ .

Por lo que respecta a la variación de deformación del pretensado, los valores teóricos y los experimentales de la galga GC05 presentan valores sensiblemente iguales hasta la rotura, lo que indica plastificación del pretensado inferior (Gráficas 10.6.1.6-4 y 10.6.1.6-9). El momento de plastificación teórico es de  $265 \text{ mkN}$ , y los valores de variación de deformación teórica correspondientes son de  $3839$  y  $3910$  ue según ambas aproximaciones.

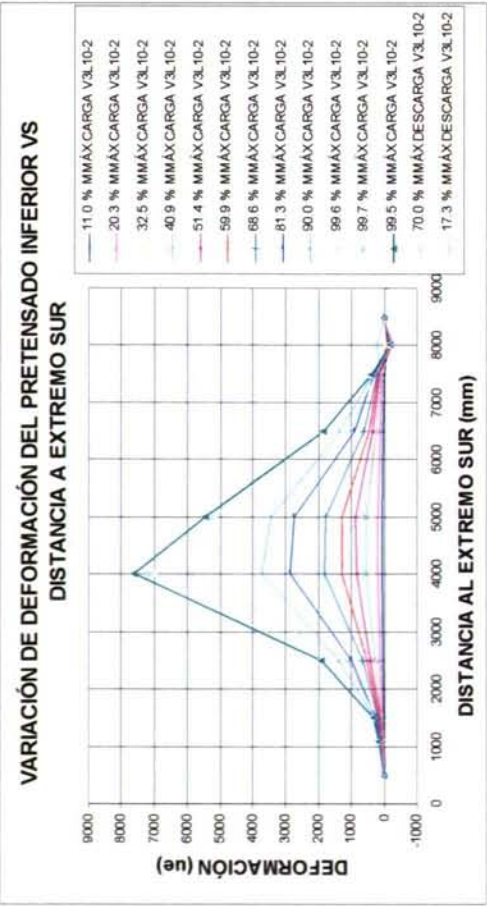
No se apreció deslizamiento a través de ninguno de los transductores o relojes comparadores.

El ensayo se paró al comenzar la viga a microfisurar por compresión, instante en que se inició una descarga progresiva que quedó registrada. El momento flector máximo fue de  $307 \text{ mkN}$ , a una distancia de  $4.1 \text{ m}$  desde el extremo Sur. Durante la descarga la recuperación de flechas fue considerable. Las fisuras de flexión, de  $0.4$ - $0.5 \text{ mm}$  al final del proceso de carga, se cerraron completamente al descargar, por lo que es difícil apreciarlas a simple vista.

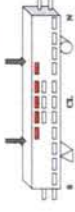
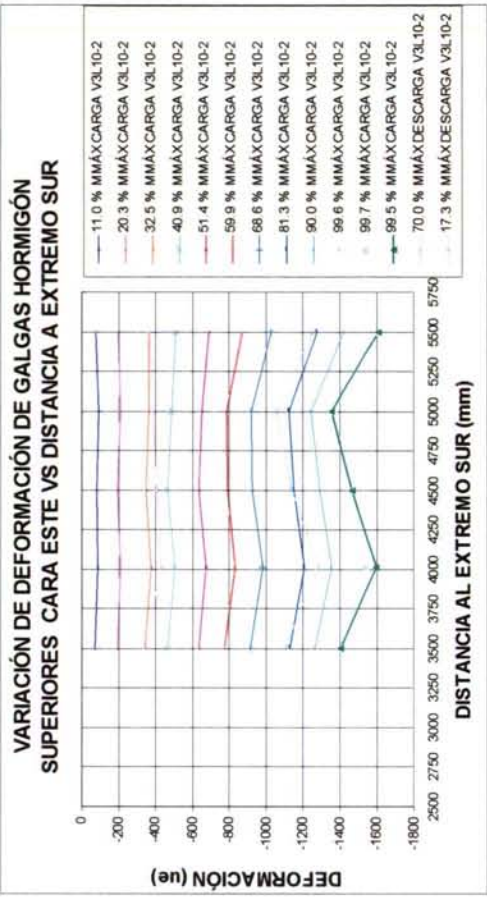
Como era de esperar, la armadura de confinamiento no experimenta variación de tensión apreciable durante el ensayo. Esto sólo sería previsible en caso de grandes deslizamientos del pretensado (Gráficas 10.6.1.6-10 y 10.6.1.6-12).

No se observan variaciones de deformación apreciables en las galgas adheridas a la armadura de cortante (Gráficas 10.6.1.6-11 y 10.6.1.6-13).

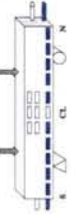
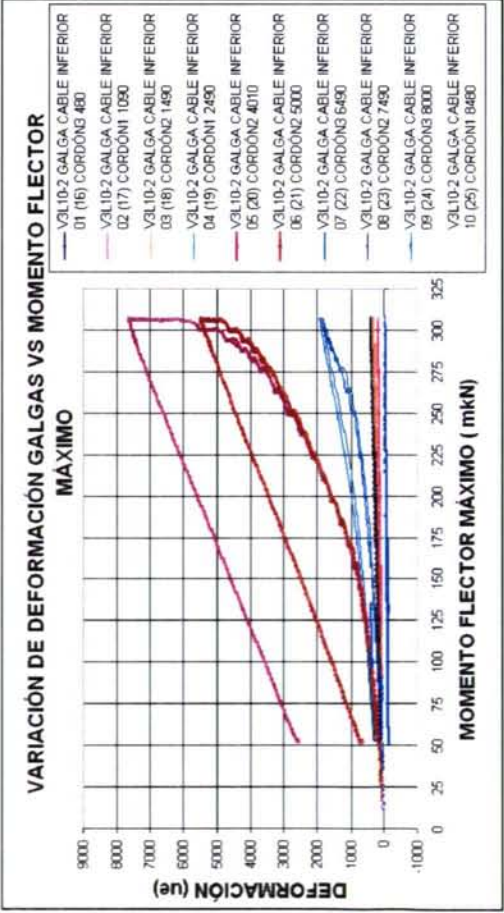
La flecha máxima alcanzada, de  $140 \text{ mm}$  es superior a la flecha de las vigas de HL10-1 ensayadas, lo que indica una mayor ductilidad de las vigas fabricadas con este material.



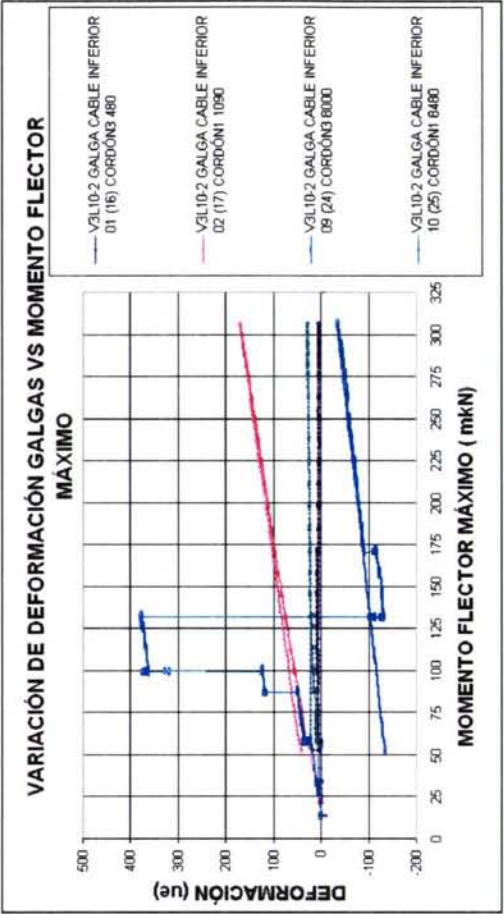
Gráfica 10.6.1.6-2



Gráfica 10.6.1.6-3

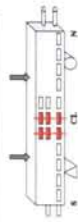
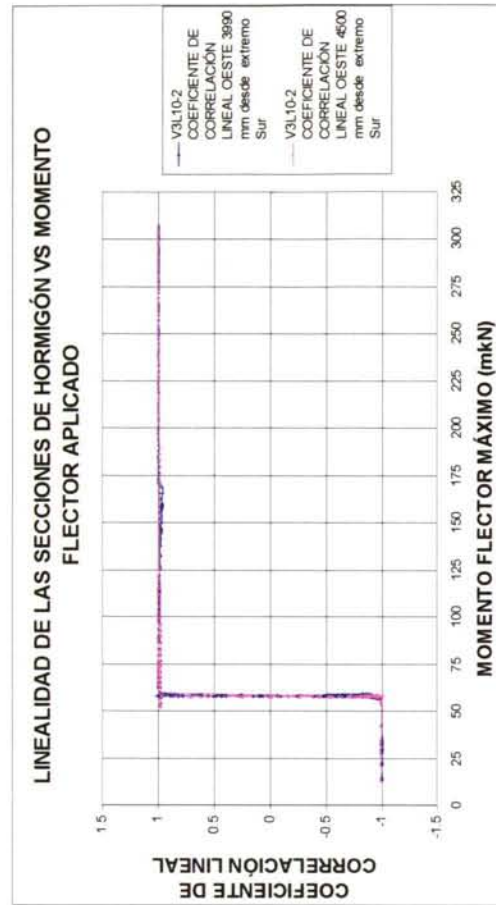


Gráfica 10.6.1.6-4

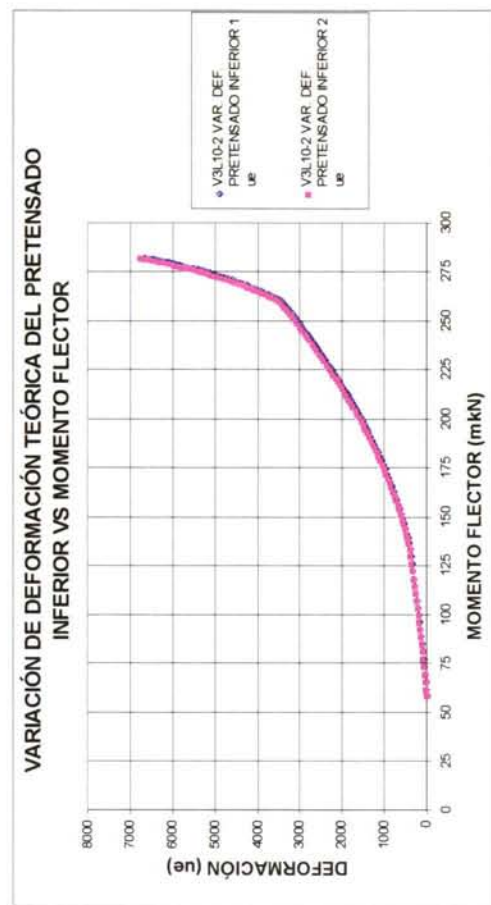


Gráfica 10.6.1.6-5

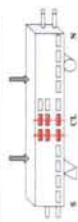
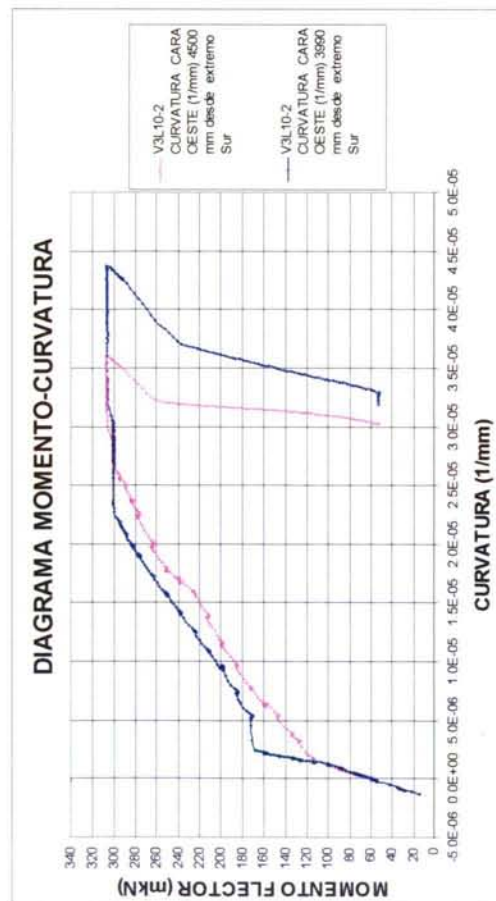




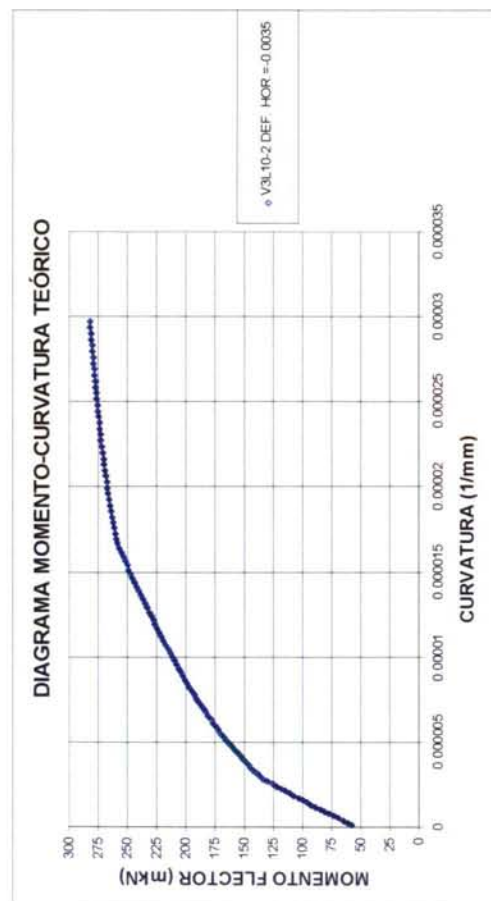
Gráfica 10.6.1.6-7



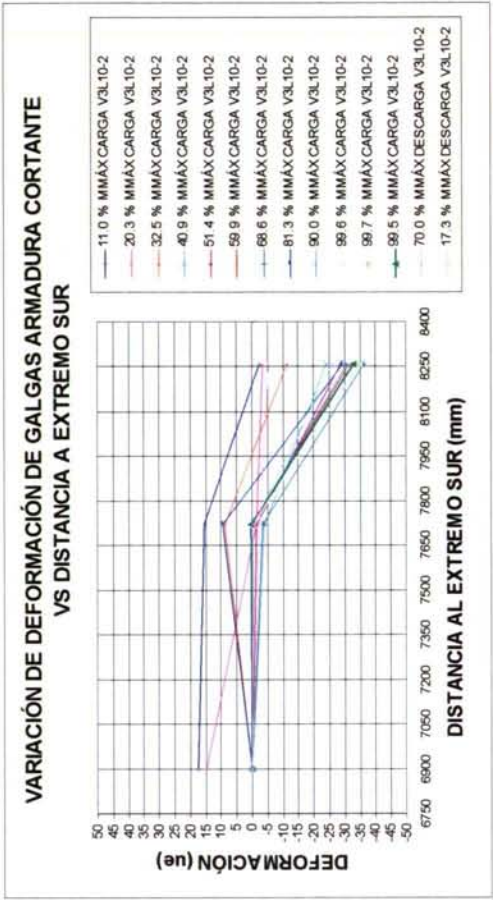
Gráfica 10.6.1.6-9



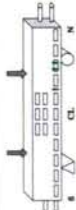
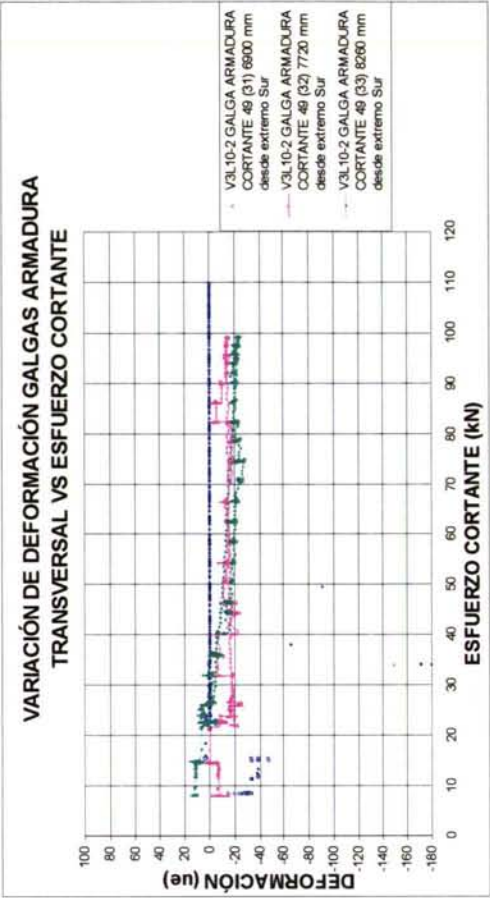
Gráfica 10.6.1.6-6



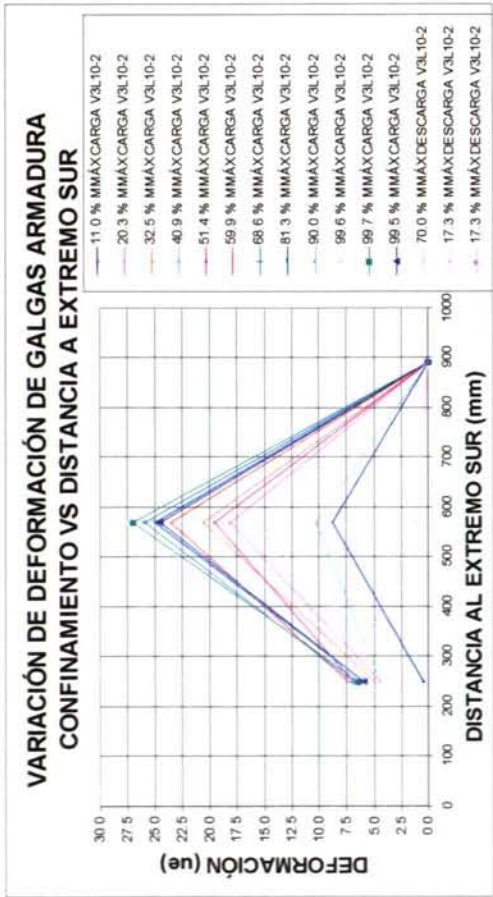
Gráfica 10.6.1.6-8



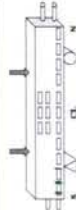
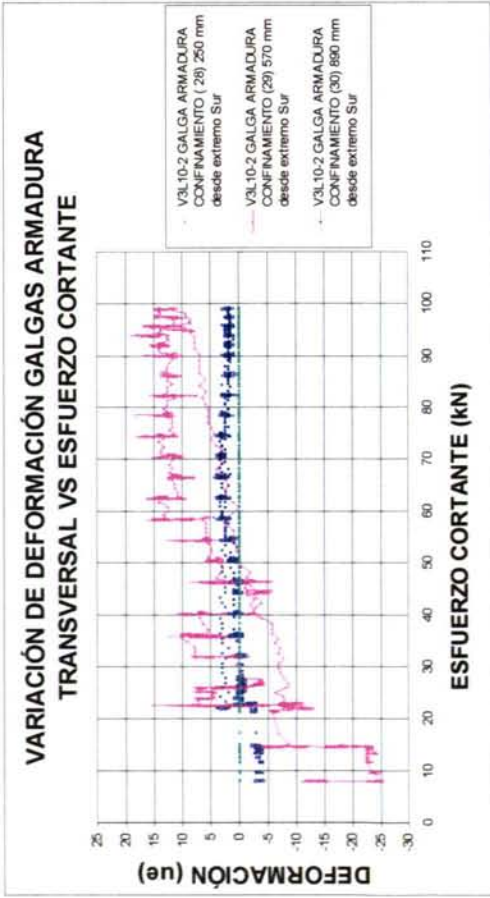
Gráfica 10.6.1.6-11



Gráfica 10.6.1.6-13



Gráfica 10.6.1.6-10



Gráfica 10.6.1.6-12



### 10.6.2. PROCEDIMIENTO DE ACOTACIÓN DE LA LONGITUD DE ANCLAJE DE LAS VIGAS DE HORMIGÓN LIGERO

Una vez realizado el ensayo a carga centrada de una viga de hormigón ligero, se plantean dos cuestiones:

Analizar la forma de rotura de la viga a carga centrada ¿rotura dúctil o rotura frágil? Es decir, necesitamos poder detectar la plastificación del pretensado, a través de las deformaciones en las galgas adheridas al mismo.

Una vez que, empleando el procedimiento expuesto anteriormente, hemos diagnosticado el tipo de rotura de las vigas V3L10-2 y V4C como rotura dúctil sin deslizamiento generalizado (Tabla 10.7.1-2), se plantea el ensayo de una viga de cada material a una distancia menor de 3.5 metros, para intentar acotar superiormente la longitud de anclaje de cada material.

En el caso del hormigón convencional, se dispone de abundante bibliografía y normativa sobre el tema (EHE98, CM90, E21395, ACIC99, ...), por lo que se conoce con buena aproximación el valor previsible de la longitud de anclaje. Sin embargo, en el caso del hormigón ligero no disponemos de resultados de investigaciones previas.

La cuestión que se plantea es, dados los resultados de los ensayos realizados previamente sobre este material, HL10-2, y los ensayos parejos realizados sobre el HC ¿Se puede predecir, conocidas las propiedades adherentes de ambos materiales en probeta, y con los datos de longitud de anclaje del HC, la longitud de anclaje del hormigón ligero?

#### 10.6.2.1. Longitud de anclaje prevista para el HC, según la EHE

Hemos estimado los valores de la longitud de transmisión, partiendo de la formulación de la EHE, teniendo en cuenta los valores de la fuerza de pretensado estimada para cada viga de hormigón convencional.

Para aplicar la formulación de la EHE hemos prescindido de los coeficientes de seguridad de los materiales.

Respecto a la resistencia a tracción del hormigón, disponemos del dato para las edades de 2 y 3 días. Para esas mismas edades y para 28 días, y cada vez que se rompía una viga, disponemos de resultados de ensayos de tracción indirecta. Hemos empleado estos resultados para extrapolar los valores de resistencia a tracción estimada a las diferentes edades. Los resultados aparecen en la Tabla 10.6.2.1-1:

Tabla 10.6.2.1-1

Fecha	Edad de ensayo $t$	$f_{ct,t}$	Carácter
10/02/00	2	3.6	Real
11/02/00	3	3.7	Real
09/03/00	30	4.1	Estimada
31/03/00	52	3.9	Estimada
07/04/00	59	3.8	Estimada

De esta forma se obtiene una estimación de la longitud de anclaje para cada una de las vigas de hormigón convencional fabricadas, reflejada en la Tabla 10.6.2.1-2.

Tabla 10.6.2.1-2

Viga		$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\phi$	$P_2$	$P_3$	$A_p$	$\sigma_{pt}$	$f_{bpd}(t)$	$l_{bpt}$	$\sigma_{pd} A_p$	$\sigma_{pc3}$	$\alpha_4$	$f_{bpd}$	$l_{bpc}$	$l_{bpd}$
					mm	kN	kN	mm <sup>2</sup>	MPa	MPa	mm	kN	kN		MPa	mm	mm
V4C	Min	1.25	0.5	0.5	15.2	191	173	142.04	1218	2	723	229	160	0.8	2.2	673	1396
V4C	Máx	1.25	1	0.5	15.2	191	173	142.04	1218	2	1446	229	160	0.8	2.2	673	2119
V5C	Min	1.25	0.5	0.5	15.2	191	177	142.04	1246	2	740	229	160	0.8	2.2	673	1413
V5C	Máx	1.25	1	0.5	15.2	191	177	142.04	1246	2	1480	229	160	0.8	2.2	673	2153
V6C	Min	1.25	0.5	0.5	15.2	193	175	142.04	1232	2	732	229	160	0.8	2.2	673	1405
V6C	Máx	1.25	1	0.5	15.2	193	175	142.04	1232	2	1463	229	160	0.8	2.2	673	2136

### 10.6.2.2. Acotación de la longitud de anclaje prevista para el HL10-2

A partir de la estimación de longitud de anclaje de las vigas de hormigón convencional realizada, y de los resultados de los ensayos de adherencia en pórtico LC realizados (Capítulo 6), intentaremos estimar los valores de la longitud complementaria a tracción de las vigas de HL10-2 fabricadas. Puesto que conocemos los valores de longitud de transmisión de la viga V2L10-2 procederemos a estimar la longitud de anclaje.

Supuesto un crecimiento lineal de la fuerza de pretensado a lo largo de la longitud de transmisión y de la longitud de adherencia a flexión (véanse las Figuras 10.6.2.2-1 y 10.6.2.2-2), la longitud de anclaje se puede expresar de la forma:

$$l_{bpd} = l_{bpt} + l_{bpc} = l_{bpt} + \left( \frac{f_{pyk} - \sigma_p(l_{bpt}, t)}{\frac{\Delta P}{\Delta x}} \right) A_p$$

donde  $\frac{\Delta P}{\Delta x} \Big|_{MAT, l_{bpc}, t}$  es la F.U.A. a lo largo de la longitud complementaria a tracción.

Necesitamos conocer en esta expresión todos los términos, para poder estimar la longitud de anclaje.

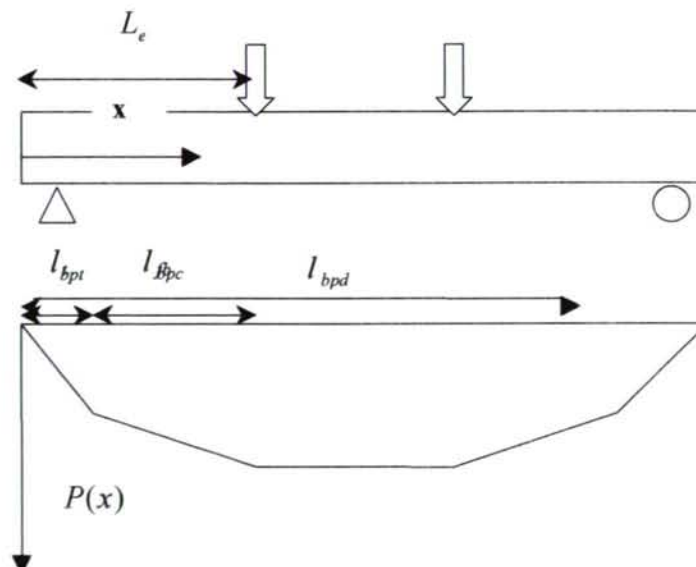


Figura 10.6.2.2-1



Conocida la longitud de transmisión de la viga, es necesario determinar:

- La tensión del pretensado al final de la longitud de transmisión, a la edad del ensayo de la viga.
- La tensión de adherencia media prevista para la longitud complementaria a tracción.
- El límite elástico del pretensado.

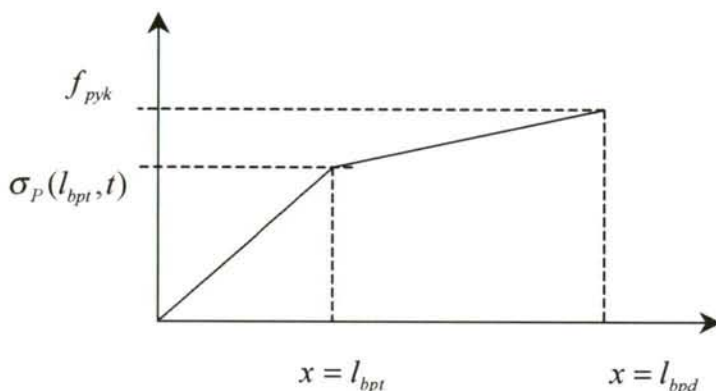


Figura 10.6.2.2-2

Necesitamos conocer la fuerza de pretensado a la edad de ensayo, a una distancia aproximada del extremo de la viga igual a la longitud de transmisión para, apoyándonos en ensayos previos, acotar superiormente la longitud complementaria a tracción.

#### Longitud de transmisión, $l_{bpt}$

Conocemos, a partir de la medida de las deformaciones superficiales del hormigón de las viga, una cota superior y una inferior para la longitud de transmisión,  $l_{bpt,m\acute{a}x}$  y  $l_{bpt,m\acute{i}n}$ .

#### Tensión del pretensado a la edad de ensayo, $\sigma_p(x \geq l_{bpt}, t)$

En un apartado anterior se detalla el algoritmo de estimación de la tensión de pretensado

$$\sigma_p(x \geq l_{bpt}, t) = \sigma_{p,est}(x \geq l_{bpt}, t)$$

#### Tensión media de adherencia de la longitud complementaria a tracción $\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{LC,t}$

Además, a partir de los ensayos en p\ortico, simulando el funcionamiento, conocemos una cota superior y una inferior de la tensión de adherencia de la zona complementaria a tracción, a la edad de transferencia, considerablemente menor a la edad de serie en servicio de la estructura,  $\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{LC,j,m\acute{a}x}$  y  $\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{LC,j,m\acute{i}n}$ , de modo que podremos acotar la longitud de anclaje total de cada material, entre un valor m\aximo y m\aximo (v\axase Cap\axitulo 6).

$$l_{bpd,m\acute{a}x} = l_{bpt,m\acute{a}x} + \frac{f_{pyk} - \sigma_{p,est}(x \geq l_{bpt}, t)}{\frac{\Delta P}{\Delta x} \Big|_{LC,j,min}} A_p$$

De esta forma podemos acotar superiormente la longitud de anclaje.

Conocida la cota superior de la longitud de transmisión de cada viga, determinada en apartados anteriores, podemos de esta forma acotar superiormente la longitud de anclaje de las vigas de HC y de HL10-2. El valor aproximado así determinado para las vigas de HC se puede comparar con la predicción de la norma, y con resultados obtenidos por diversos investigadores.

Por otra parte se realizó una comprobación de la capacidad resistente de las vigas de cada material a cortante, para determinar la longitud mínima a la que se podía aplicar la carga sin que se produjese fallo o fisuración excesiva a cortante. Esta comprobación limitó la longitud a 2.75 metros en las vigas de HC.

De esta forma se decidió ensayar las vigas siguientes aplicando las cargas simétricas a una distancia del apoyo más cercano, igual a los valores de la Tabla 10.6.2.2-1.

Tabla 10.6.2.2-1

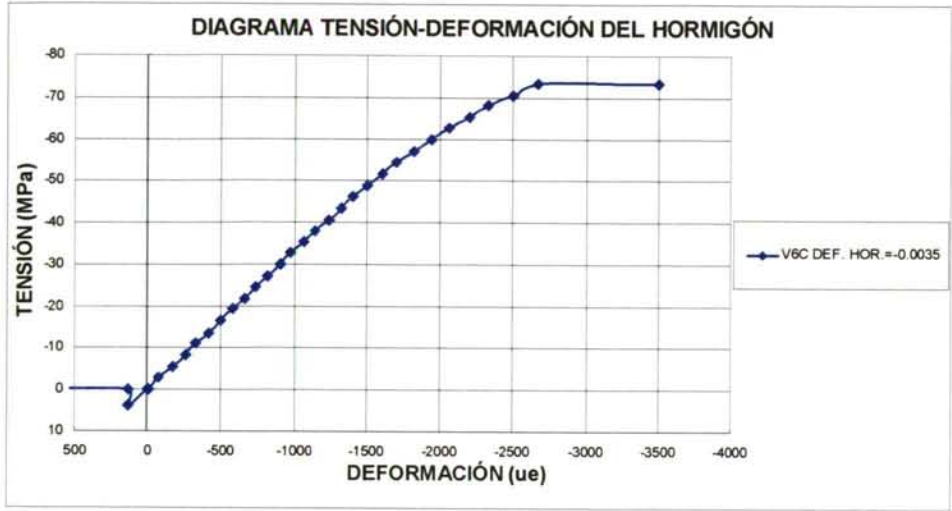
Viga	Longitud $L_e$ (m)
V6C	2.75
V1L10-2	3.25

### 10.6.3. ENSAYOS REALIZADOS PARA INTENTAR ACOTAR LA LONGITUD DE ANCLAJE

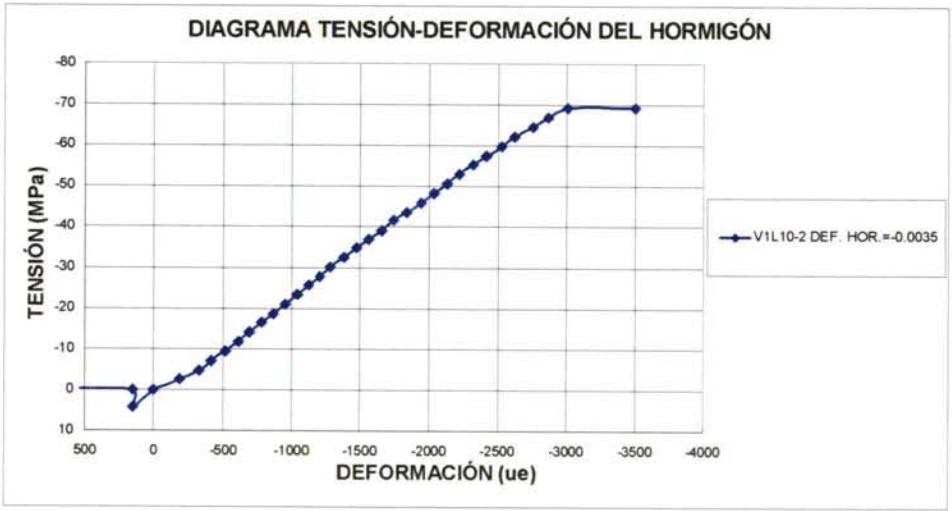
A la edad de ensayo de la viga, también se ensayaron probetas procedentes de la misma amasada, conservadas junto a las vigas. Se determinó el módulo de deformación secante y la resistencia a compresión. Las probetas se instrumentaron con bandas extensométricas longitudinales, por lo que se obtuvo el diagrama tensión-deformación hasta prerrotura (dado que el control efectuado, como se explicó en el Apartado 10.6.1, fue por carga).

En las Gráficas 10.6.3-1 y 10.6.3-2 se observan los diagramas tensión-deformación obtenidos para las probetas cilíndricas de las vigas V6C y V1L10-2, empleados para describir el comportamiento tensodeformacional del hormigón en los diagramas momento-curvatura teóricos.





Gráfica 10.6.3-1

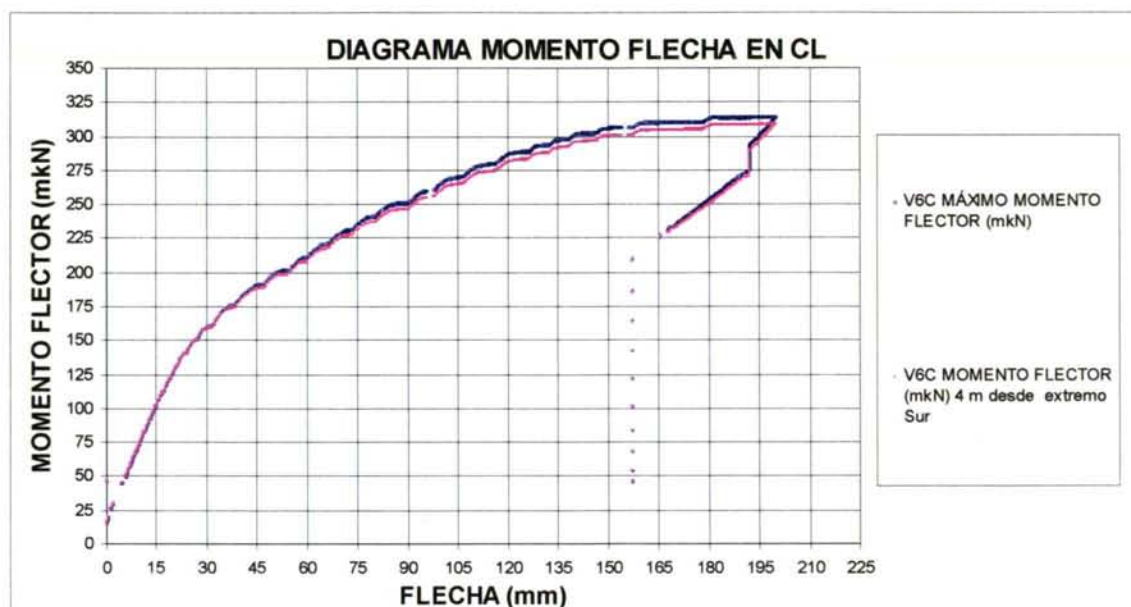


Gráfica 10.6.3-2

10.6.3.1. Viga V6C

Tabla 10.6.3.1-1

Viga	V6C			Unidad
Peso viga		18.8		kN
Densidad		26.11		kN/m <sup>3</sup>
Armadura transversal	c 8 a 15			
Distancia desde extremos a cargas aplicadas		2.75		m
Máximo momento flector		313.9		mkN
Máximo reacción apoyo	Norte	142.0		kN
Máximo reacción apoyo	Sur	149.7		kN
Máx/min esfuerzo cortante zona central	2.8 m	3.2	-1.6	kN
Máx/min esfuerzo cortante zona central	6.3 m	8.9	4.1	kN
Máxima flecha		200.1		mm
Tangente FI	(Ductilidad)	0.093		m/m



Gráfica 10.6.3.1-1

Analizando el diagrama {momento flector máximo en la viga} respecto a la {flecha en CL}, se aprecia una pérdida de linealidad del diagrama momento-flecha para un momento flector aproximado de 125 mkN (Gráfica 10.6.3.1-1), momento de fisuración aparente. Las primeras fisuras de flexión fueron detectadas visualmente para un momento flector entre 146 y 157 mkN. Se aprecia que el tramo final de la curva es prácticamente horizontal, indicio de plastificación probable. La rama de descarga es considerablemente lineal, el escalón que aparece es consecuencia de la recolocación del transductor en CL.

Analizando la gráfica de {variación de deformación del pretensado} respecto a la {distancia al extremo Sur} para diferentes momentos del ensayo (Gráfica 10.6.3.1-2) se aprecia una variación de deformación máxima:

$$\Delta \epsilon_{p\text{máx}}^* = 8800 \text{ ue}$$

valor que posteriormente compararemos con la variación de deformación necesaria estimada para considerar el pretensado plastificado en zona central. La pendiente de la curva variación de deformación respecto al momento flector máximo es muy elevada al final del ensayo, en prerrotura, lo que es indicio de plastificación del pretensado. No se ha detectado deslizamiento a partir de las medidas de ninguna galga de pretensado a lo largo del ensayo. Se observa una mayor variación de deformación en el extremo Sur, aparentemente es el más cargado.

La máxima variación de deformación registrada en las galgas de hormigón superiores de la zona central es de -1250 ue (Gráfica 10.6.3.1-3).

Se aprecia variación de la deformación de las galgas de pretensado de ambos extremos, excepto en las más exteriores, galgas de cable 01 y 10 (Gráficas 10.6.3.1-4 y 10.6.3.1-5). La variación de deformación de las galgas más próximas a los extremos es aproximadamente lineal con el momento flector máximo en carga y en descarga (Gráfica 10.6.3.1-5). Las galgas de pretensado de los extremos no experimentan apenas variación de deformación, lo que indica que estos cordones de pretensado no deslizaron.



Por ello el deslizamiento, en caso de haberse producido no es generalizado en ninguno de los extremos.

Analizando el diagrama momento-curvatura se aprecia una rama inicial sensiblemente lineal, hasta un momento de 180 mkN, de fisuración aparente (Gráfica 10.6.3.1-6). Al producirse la fisuración comienza un escalón de cedencia muy prolongado, seguido de una segunda fase fisurada, sensiblemente lineal, más tendida que la rama inicial. La rama final de prerrotura comienza para un momento de 250 mkN, y en ella se observa inicialmente un endurecimiento (mayor rigidez). La parte final de la curva presenta una pendiente nula, indicio de la plastificación del pretensado inferior. La curvatura máxima alcanzada durante el ensayo es de  $3E-5$  1/mm. El coeficiente  $R$  es elevado hasta el momento máximo (Gráfica 10.6.3.1-7). La viga no se llevó hasta rotura debido a las deformaciones excesivas (flecha en CL de 200 mm), que motivaron que estuviesen a punto de entrar en contacto la viga de reparto y la viga ensayada, en los extremos.

El diagrama momento-curvatura experimental (Gráfica 10.6.3.1-6) difiere del teórico (Gráfica 10.6.3.1-8) en el valor del momento de fisuración aparente. El diagrama experimental presenta un escalón de cedencia marcado. Los valores de curvatura máxima son similares en ambos diagramas, teórico y experimental, de  $3.5E-5$  1/mm. El momento último predicho es un 8% inferior al momento flector máximo registrado.

Por lo que respecta a la variación de deformación del pretensado, los valores teóricos y los experimentales son sensiblemente iguales hasta la rotura, lo que indica plastificación del pretensado inferior (Gráficas 10.6.3.1-4 y 10.6.3.1-9). El momento de plastificación teórico corresponde a 267 mkN, y los valores de variación de deformación del alambre correspondientes son de 3839 y 3910  $\mu\epsilon$  según las dos aproximaciones del Apartado 4.4. No se aprecia deslizamiento de ninguna de las galgas de pretensado de la zona central, en la Gráficas 10.6.3.1-4.

Ningún transductor de desplazamiento detectó deslizamiento alguno. Sin embargo, el reloj comparador del extremo Sur, situado en el cordón central detectó deslizamiento a 256 mkN, de 0.001 mm (véase la Tabla 10.6.3.1-2).

Tabla 10.6.3.1-2

Viga	Fecha de ensayo	Extremo viga	Cordón	Deslizamiento inicial	Momento deslizamiento inicial (kN)	Deslizamiento final	Precisión reloj	Diagnóstico
V6C	27-04-00	Norte	3	0		0	0.01	No detectado deslizamiento
		Norte	1	0		0	0.01	No detectado deslizamiento
		Sur	2	0.001	256	0.001	0.001	Deslizamiento

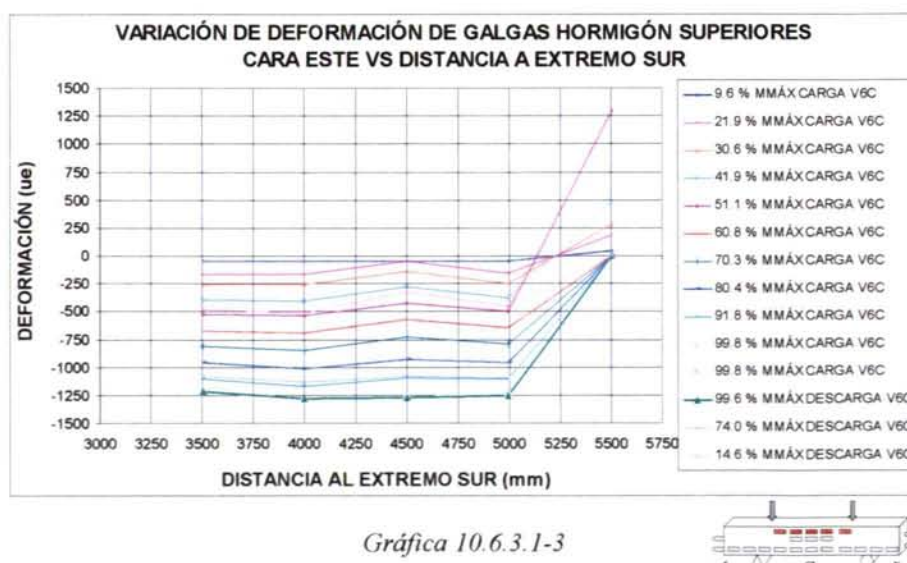
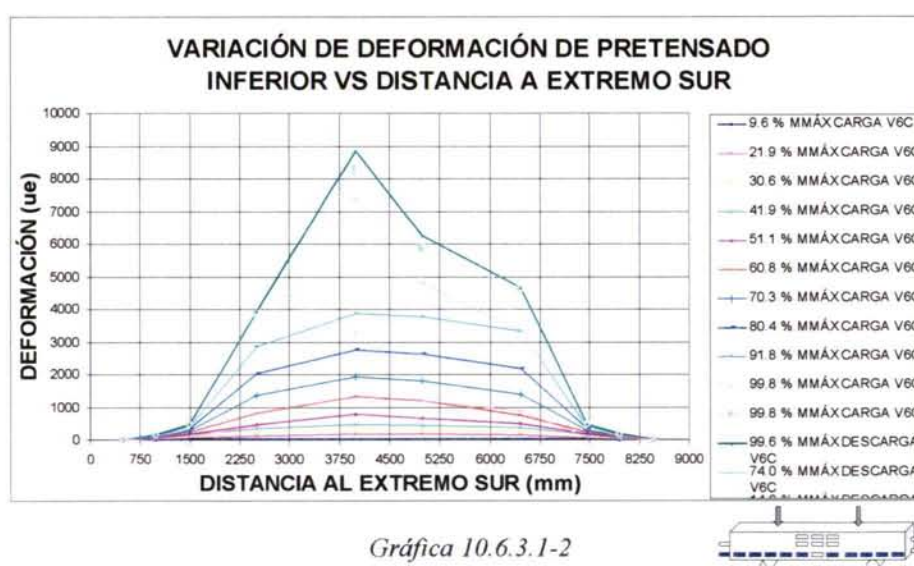
Como era de esperar, la armadura de confinamiento no experimenta variación de deformación apreciable durante el ensayo (Gráfica 10.6.3.1-10). Esto sólo sería previsible en caso de grandes deslizamientos del pretensado.

Se aprecia variación de deformación apreciable de la galga adherida a la armadura de cortante a unos 2580 mm del extremo Sur (Gráfica 10.6.3.1-11), lo que supone, considerando un módulo de deformación de 200000 MPa, una variación de 200 MPa aproximadamente. La banda está cercana a la zona de aplicación de la carga, lo que puede ser la causa de que durante el inicio del ensayo registre deformaciones de compresión en la armadura transversal.

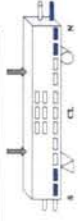
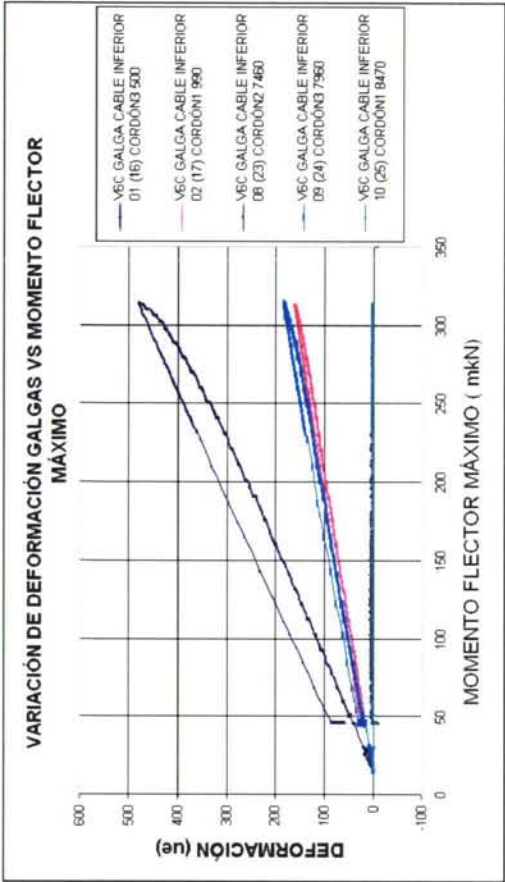
En la Gráfica 10.6.3.1-12 se aprecia la deformación total del pretensado a lo largo de la viga, durante el ensayo. Se observa aumento de deformaciones en la zona central, mientras que las galgas extremas sólo detectan pequeñas variaciones de deformación.

En la Gráfica 10.6.3.1-13 se aprecia el aumento de deformación de la armadura transversal respecto al cortante máximo en la viga, correspondiente a la reacción del apoyo. Inicialmente se observa una ligera compresión de la armadura a cortante, probablemente debido a la cercanía de la carga puntual aplicada (menos de 30 centímetros). Posteriormente se aprecia el aumento de la deformación de tracción, hasta que finalmente la pendiente es muy elevada, debido a la abertura de las fisuras de flexión-cortante en la zona (Anexo 6).

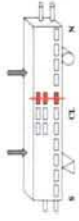
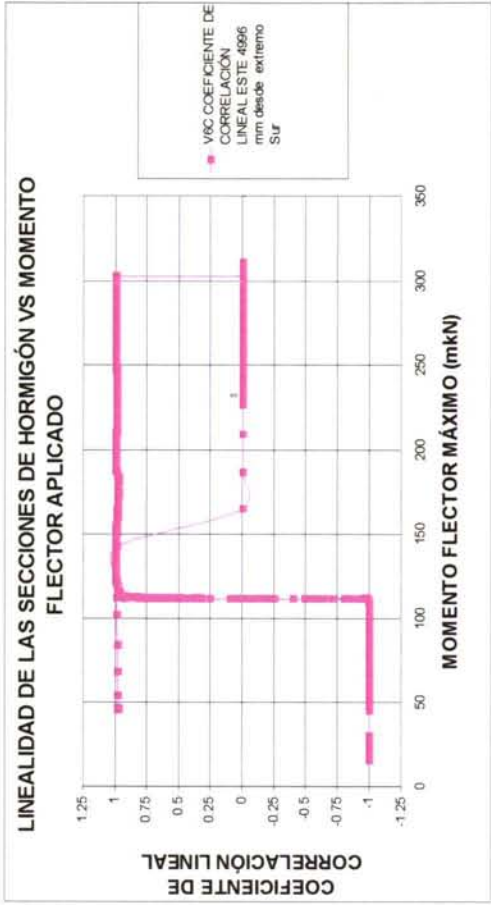
La flecha máxima alcanzada, de 200 mm, es muy superior a la flecha de las vigas de HL10-1 y de HL10-2 ensayadas, lo que indica una mayor ductilidad de las vigas fabricadas con este material. La recuperación de flecha fue considerable. Las fisuras de flexión, de 0.4 mm de abertura al final del proceso de carga, se cerraron completamente al descargar.



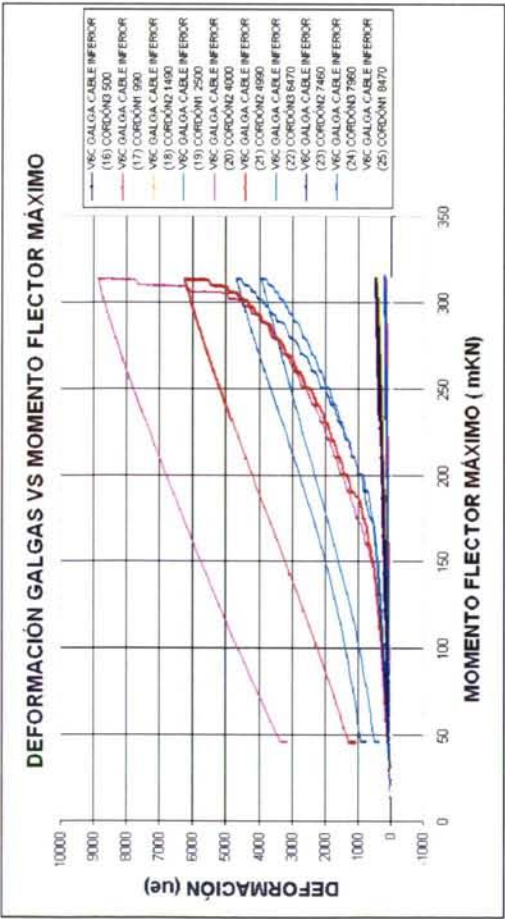




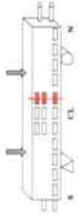
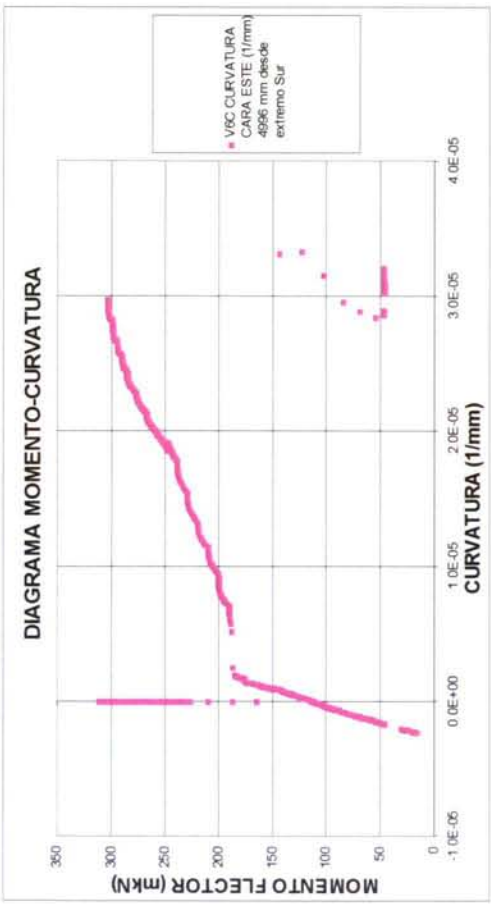
Gráfica 10.6.3.1-5



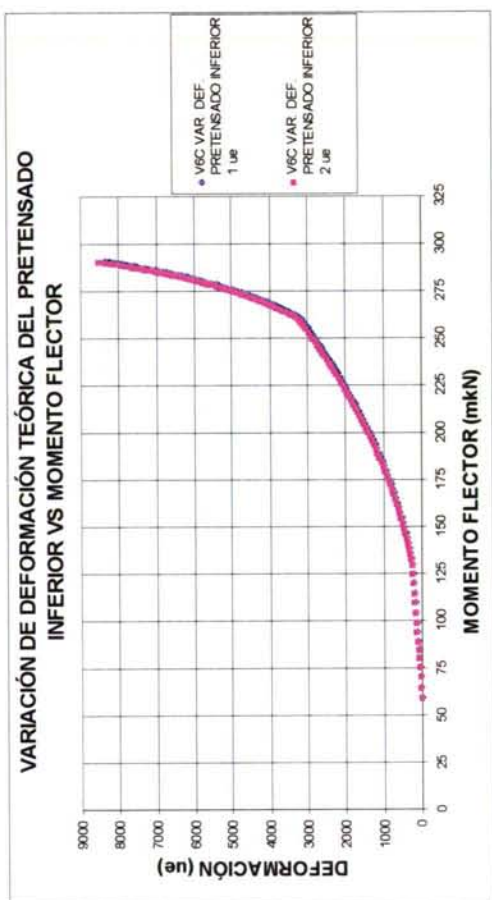
Gráfica 10.6.3.1-7



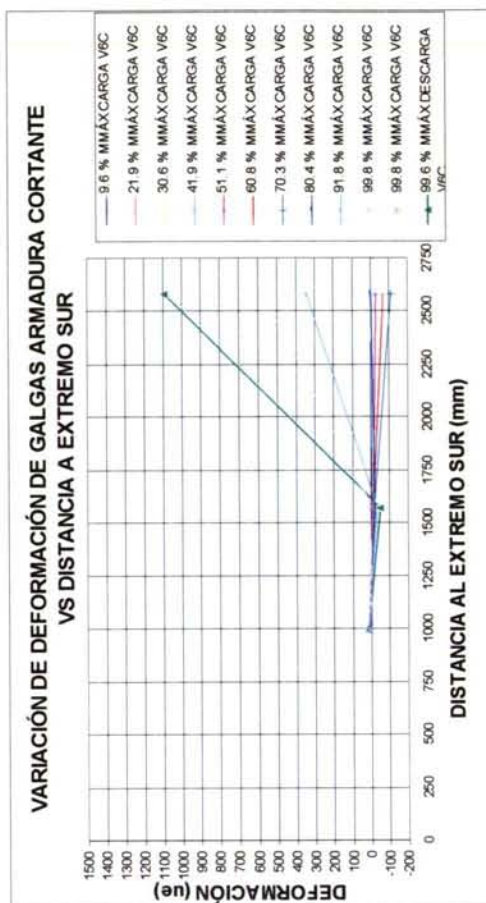
Gráfica 10.6.3.1-4



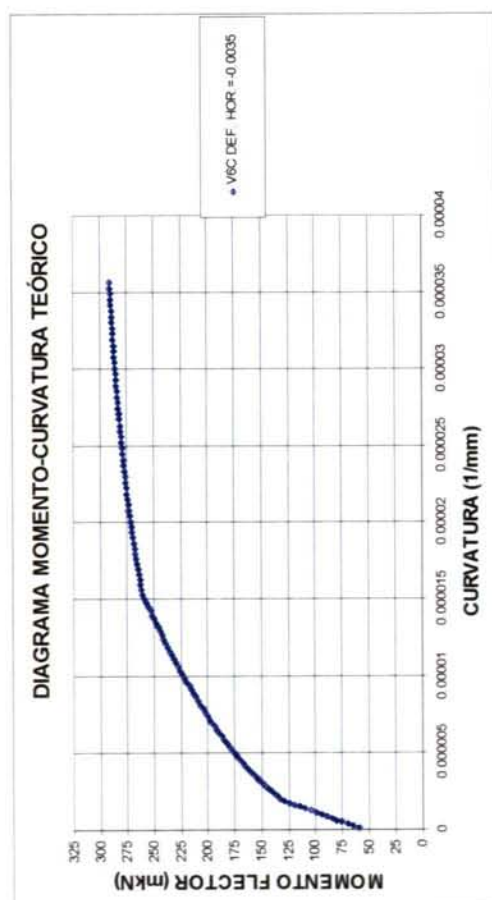
Gráfica 10.6.3.1-6



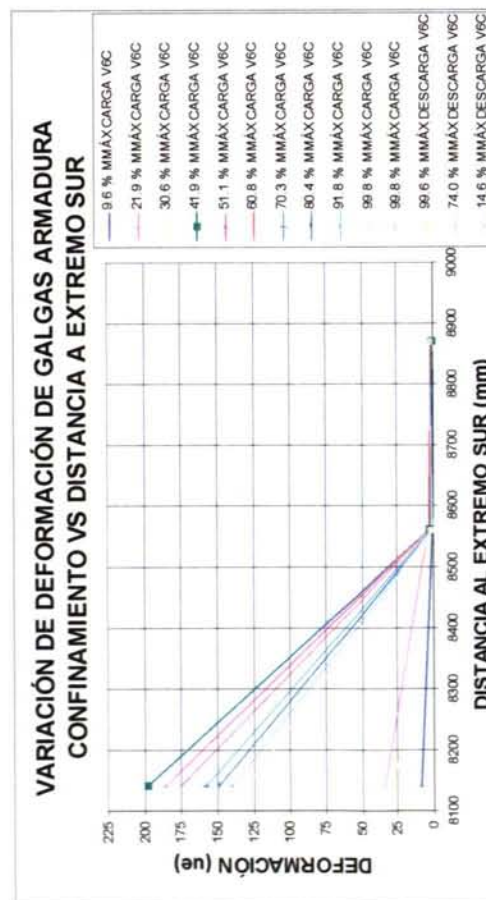
*Gráfica 10.6.3.1-9*



*Gráfica 10.6.3.1-11*

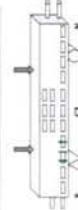
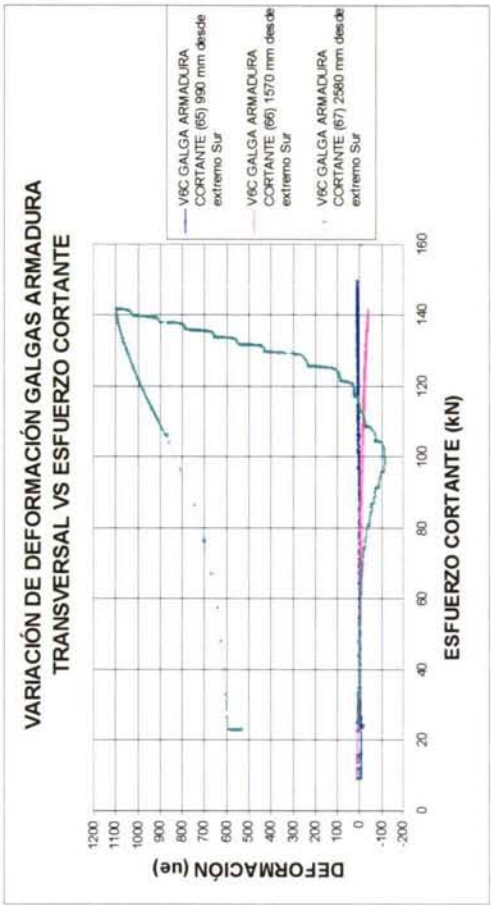


*Gráfica 10.6.3.1-8*

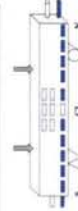
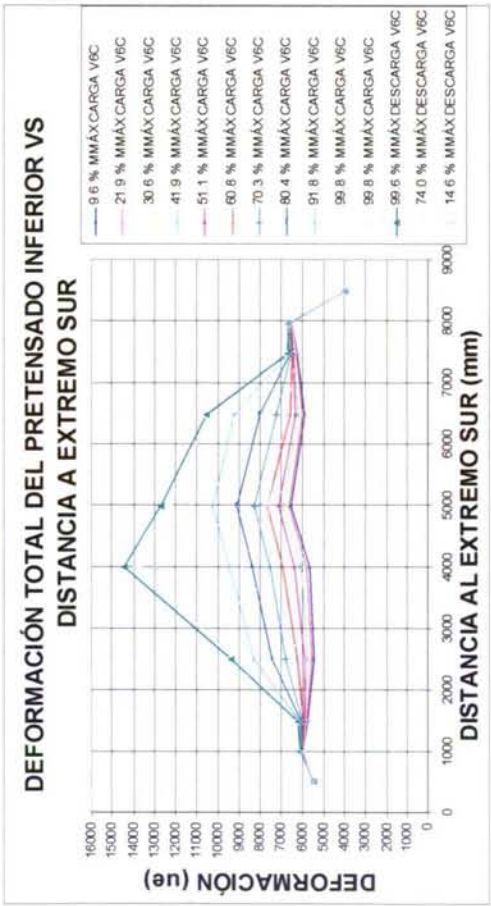


*Gráfica 10.6.3.1-10*





Gráfica 10.6.3.1-13

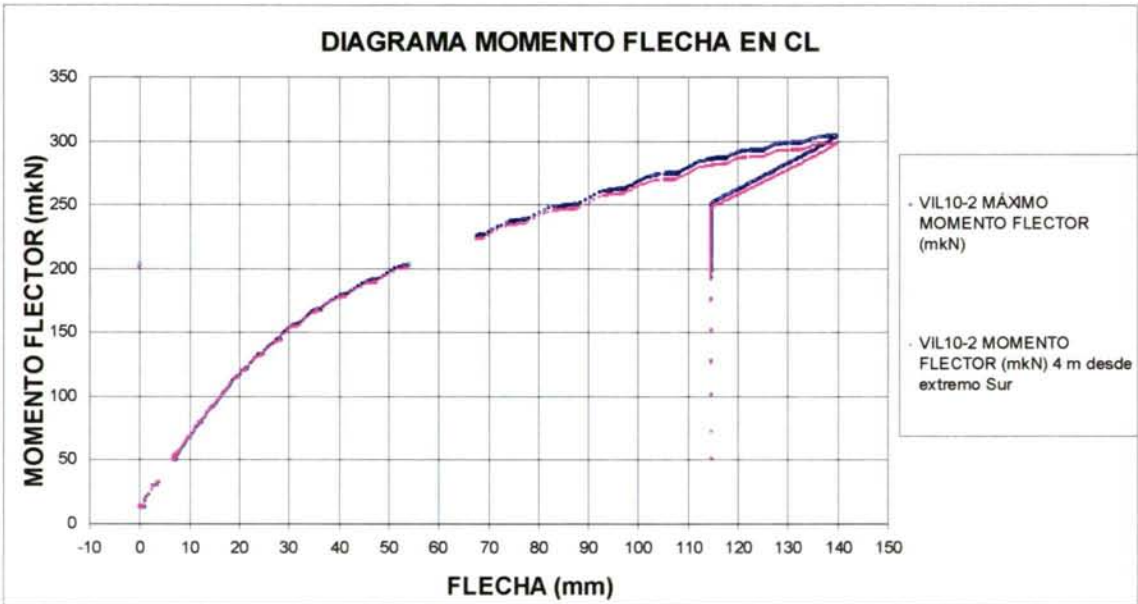


Gráfica 10.6.3.1-12

10.6.3.2. Viga VIL10-2

Tabla 10.6.3.2-1

Viga	VIL10-2			Unidad
Peso viga		16.5		kN
Densidad		2.29		kN/m <sup>3</sup>
Armadura transversal	c 8 a 15			
Distancia desde extremos a cargas aplicadas		3.25		m
Máximo momento flector		304.5		mkN
Máximo reacción apoyo	Norte	112.6		kN
Máximo reacción apoyo	Sur	118.6		kN
Máx/min esfuerzo cortante zona central	3.3 m	1.6	-4.1	kN
Máx/min esfuerzo cortante zona central	5.8 m	8.6	3.0	kN
Máxima flecha		139.6		mm
Tangente FI	(Ductilidad)	0.053		m/m



Gráfica 10.6.3.2-1

El tramo lineal inicial del diagrama {momento flector en la zona central}-{flecha en CL} acaba en 120 a 125 mkN aproximadamente (Gráfica 10.6.3.2-1), momento de fisuración aparente. Se aprecia que el tramo final de la curva es bastante tendido, lo que puede ser indicio de plastificación. La rama de descarga es muy lineal. Las primeras fisuras fueron detectadas visualmente para un momento flector comprendido entre 121 y 126 mkN.

La variación de deformación total del pretensado supera el 1% al final del ensayo (Gráfica 10.6.3.2-15). Esto indica que el pretensado esté realmente plastificado, incluso teniendo en cuenta que la relajación del pretensado le confiere una tensión aparente superior a la real.

Se puede apreciar que la ley de variación de la deformación del pretensado inferior se mantiene simétrica respecto a centro luz, hasta el 80% del momento máximo (Gráfica 10.6.3.2-2), cuando se empieza a producir plastificación de uno de los lados. En ese momento se pierde la simetría, ya que hay una zona que cede ante la deformación impuesta, se forma una rótula parcialmente plástica, que conduce finalmente a un



mecanismo. Esto puede justificar el hecho de que, una vez alcanzada la plastificación en la parte más cargada de la viga, no plastifique la otra.

Analizando la gráfica de variación de deformación del pretensado respecto a la distancia al extremo Sur (Gráfica 10.6.3.2-2) se aprecia una variación de deformación máxima:

$$\Delta \varepsilon_{p \text{ máx}}^* = 5500 \text{ ue}$$

que posteriormente compararemos con la variación de deformación necesaria estimada para considerar el pretensado plastificado en zona central. La pendiente de la curva variación de deformación respecto al momento flector máximo (Gráfica 10.6.3.2-4) es considerable al final del ensayo, en prerrotura, pero inferior a la de la viga V3L10-2. Se detecta el fallo de la galga 06. Se observa una mayor variación de deformación en el extremo Sur, aparentemente es el más cargado.

La variación de deformación de las galgas más próximas al extremo Sur es aproximadamente lineal con el momento flector máximo. Las galgas de pretensado de los extremos no experimentan apenas variación de deformación, lo que indica que estos cordones de pretensado no deslizaron (véase la Gráfica 10.6.3.2-5). Se aprecia un comportamiento anómalo de la galga de cable 01, probablemente debido a un fallo de la misma.

Analizando los diagramas momento-curvatura (Gráfica 10.6.3.2-6) se dispone de la rama hasta rotura de ambos, se aprecia en uno de ellos escalón de cedencia, debido a la fisuración a través de la banda inferior. El coeficiente  $R$  es elevado. El comportamiento anómalo de la curva de la cara Este es debido probablemente a la rotura de una de las bandas.

Los diagramas momento-curvatura experimentales (Gráfica 10.6.3.2-6) difieren del teórico (Gráfica 10.6.3.2-8) en el valor del momento de fisuración aparente. Los valores de curvatura máxima son similares en ambos diagramas, teórico y experimental, de  $3.0\text{E-}5$  1/mm, a pesar de la diferencia de pendiente de la curva teórica y experimental. El momento último predicho es inferior al máximo registrado, en un 8%.

Por lo que respecta a la variación de deformación del pretensado, el valor teórico correspondiente al momento de plastificación, de 3829 y 3900 ue según las aproximaciones del Apartado 4.4, es superado por la variación de deformación registrada por la 05 en prerrotura (Gráficas 10.6.3.2-4 y 10.6.3.2-9). El momento de plastificación teórico es de 265 mkN. No se aprecia el deslizamiento de ninguna galga de la zona central.

El ensayo se paró al comenzar la viga a microfisurar por compresión, instante en que se inició una descarga progresiva que quedó registrada. El momento flector máximo fue de 304 mkN, y se produjo a una distancia de 3.25 m desde el extremo Sur. Durante la descarga la recuperación de flechas fue considerable. Como se puede observar, la deformación de las galgas de pretensado durante la descarga sigue un comportamiento marcadamente lineal y, a pesar de que la recuperación de flecha fue prácticamente total, la deformación remanente de las galgas de pretensado parece confirmar la plastificación del mismo en la zona central. Las fisuras de flexión, de 0.4 mm al final del proceso de carga, se cerraron completamente al descargar.

Como era de esperar, la armadura de confinamiento no experimenta variación de tensión apreciable durante el ensayo. Esto sólo sería previsible en caso de grandes deslizamientos del pretensado (Gráficas 10.6.3.2-10 y 10.6.3.2-12). Tampoco se

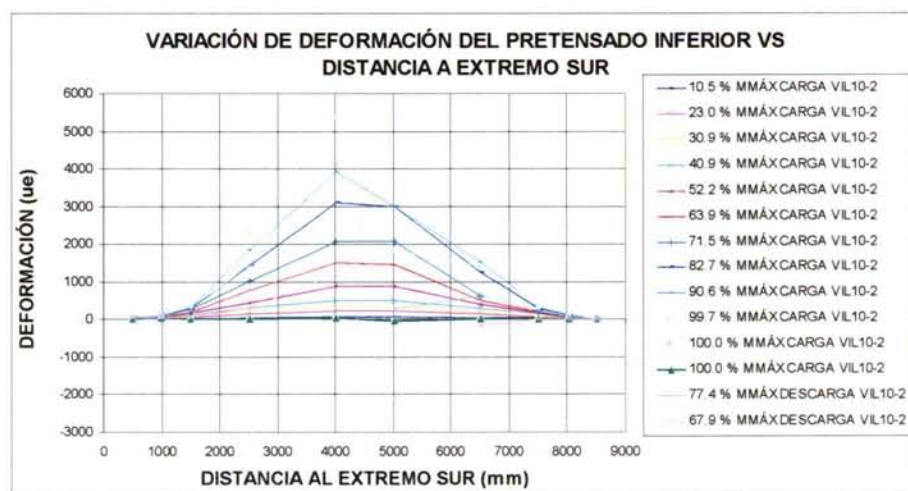
observan variaciones de deformación apreciables en las galgas adheridas a la armadura de cortante (Gráficas 10.6.3.2-11 y 10.6.3.2-13).

En la Gráfica 10.6.3.2-14 se aprecia el comportamiento de las galgas de cable del extremo Norte, galgas 06 a 10, respecto al máximo momento flector. Se observa el deslizamiento o fallo de la galga 06 durante el ensayo.

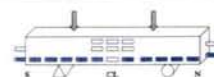
En la Gráfica 10.6.3.2-15 se presenta la deformación total del pretensado a lo largo de la viga. Se observa el fallo de las galgas 02 y 09. Como en la viga del apartado anterior, viga V6C, apenas se aprecia aumento de deformación del pretensado en las galgas cercanas a los extremos.

La flecha máxima alcanzada, de 140 mm, es superior a la flecha de las vigas de HL10-1 ensayadas, lo que indica una mayor ductilidad de las vigas fabricadas con este material.

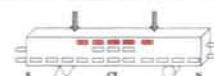
No se detectó deslizamiento a través de ninguno de los transductores electrónicos y relojes comparadores. De esto se deduce que el deslizamiento, en caso de haberse producido, no ha sido generalizado.



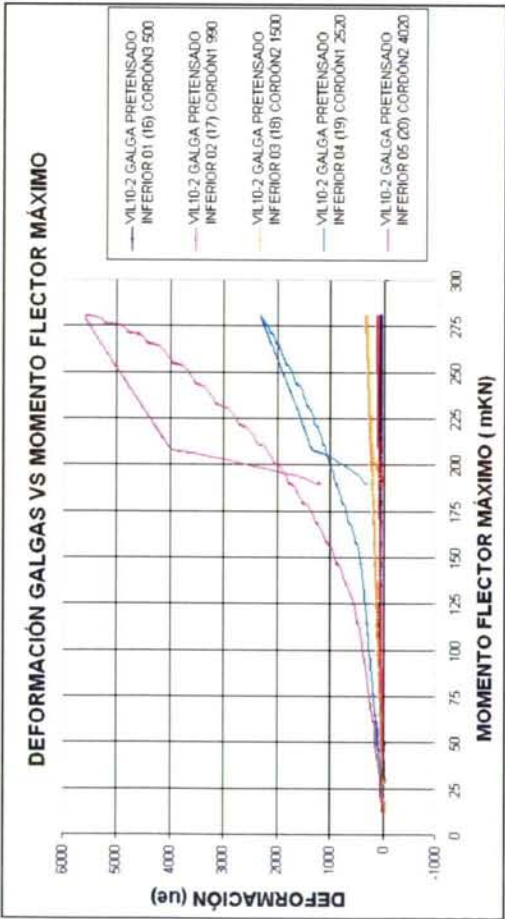
Gráfica 10.6.3.2-2



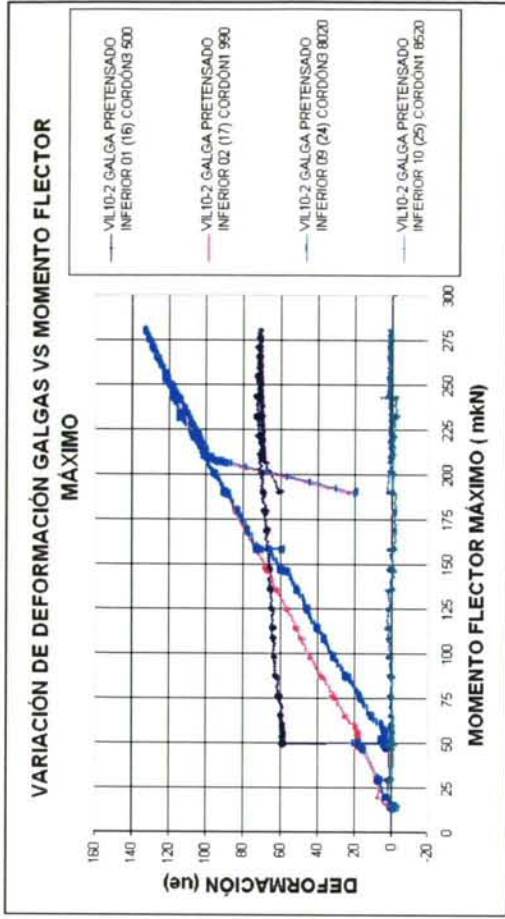
Gráfica 10.6.3.2-3



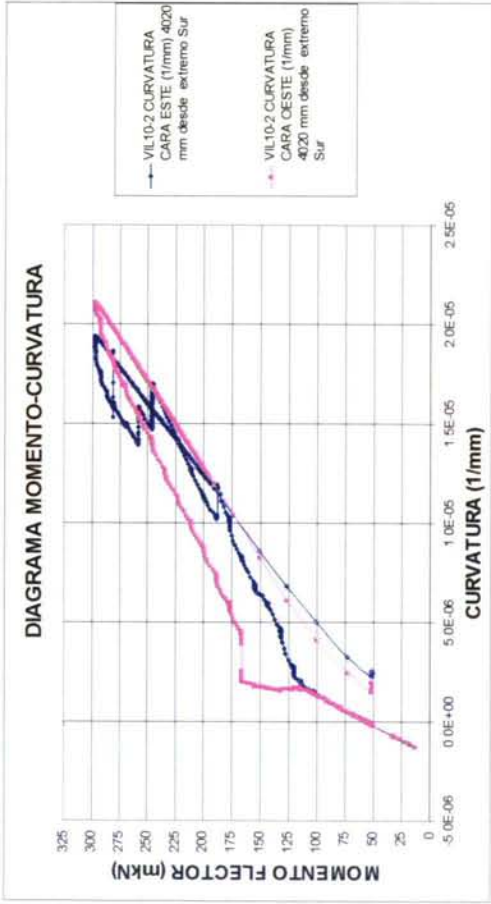




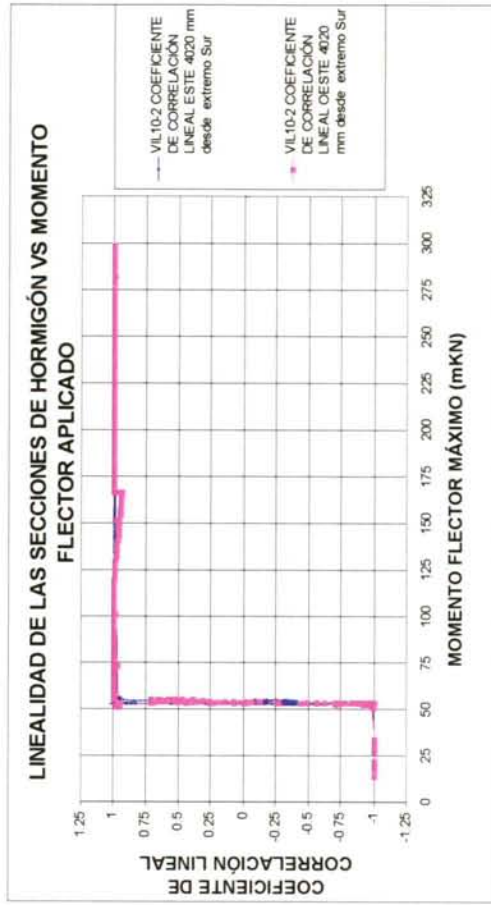
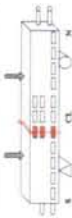
Gráfica 10.6.3.2-4



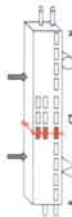
Gráfica 10.6.3.2-5

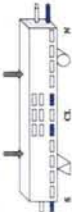
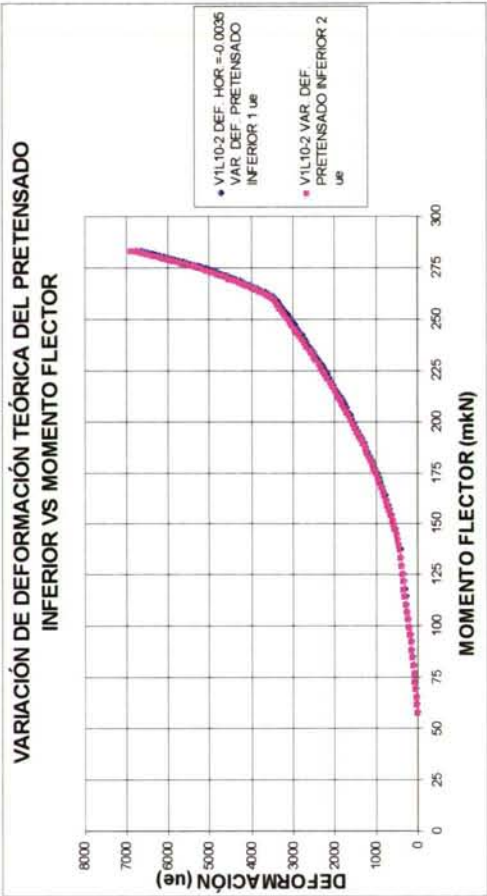


Gráfica 10.6.3.2-6

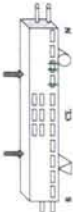
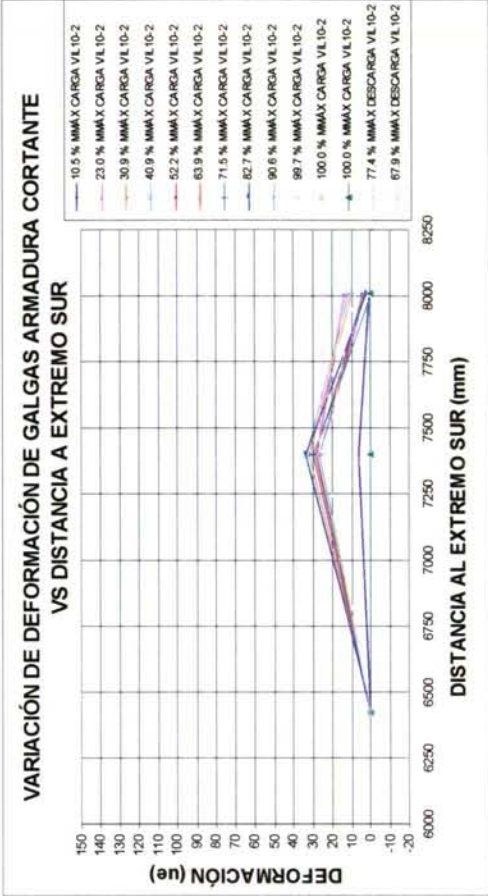


Gráfica 10.6.3.2-7

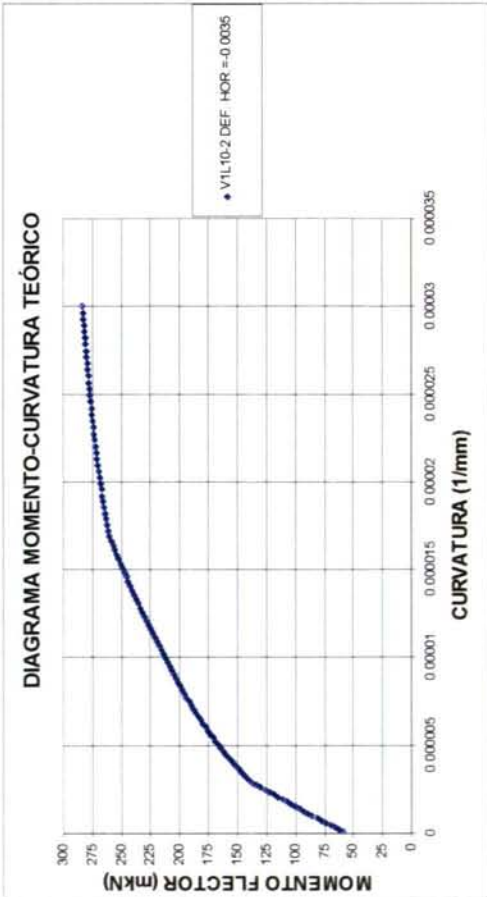




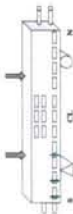
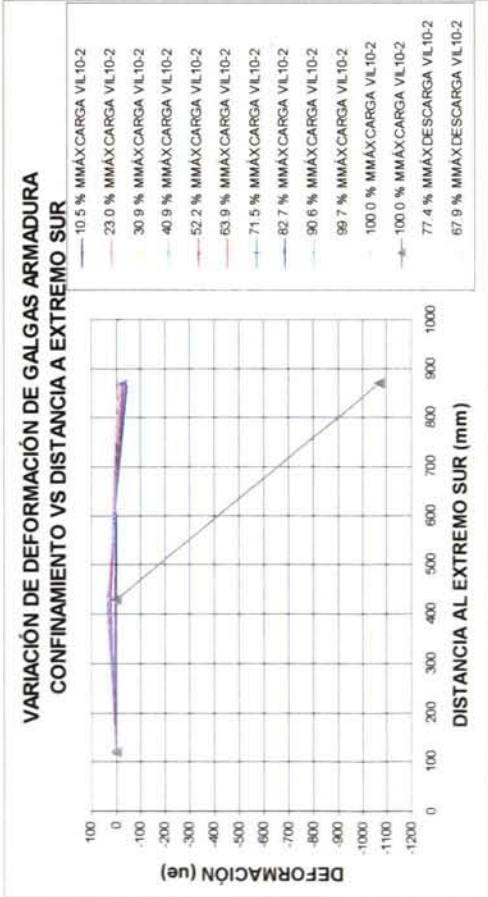
Gráfica 10.6.3.2-9



Gráfica 10.6.3.2-11

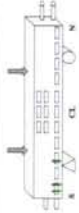
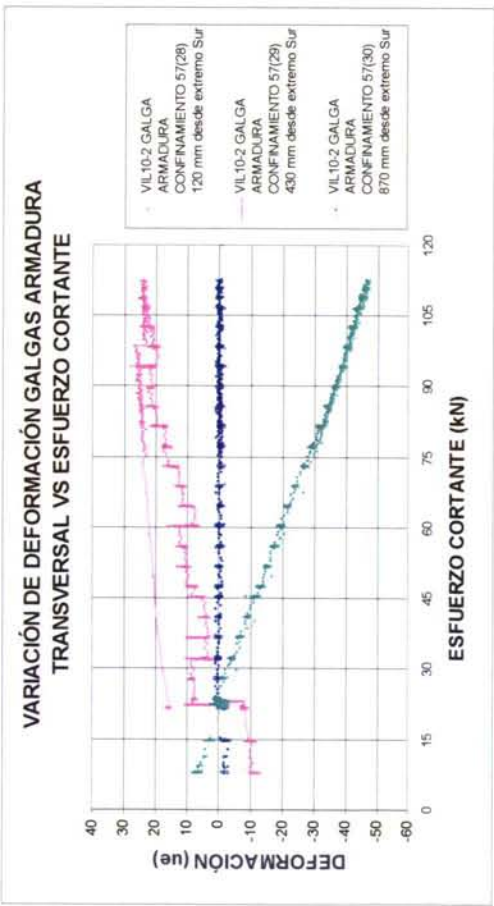


Gráfica 10.6.3.2-8

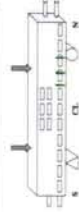
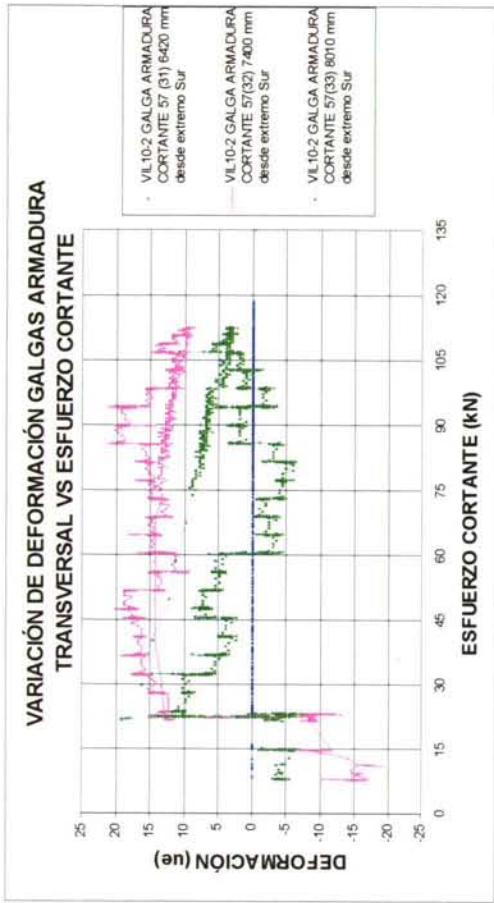


Gráfica 10.6.3.2-10

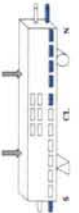
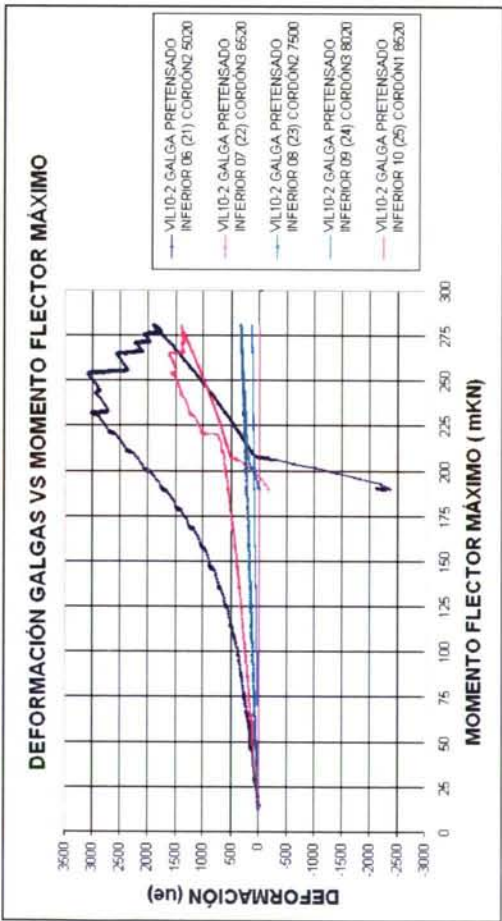




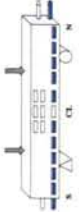
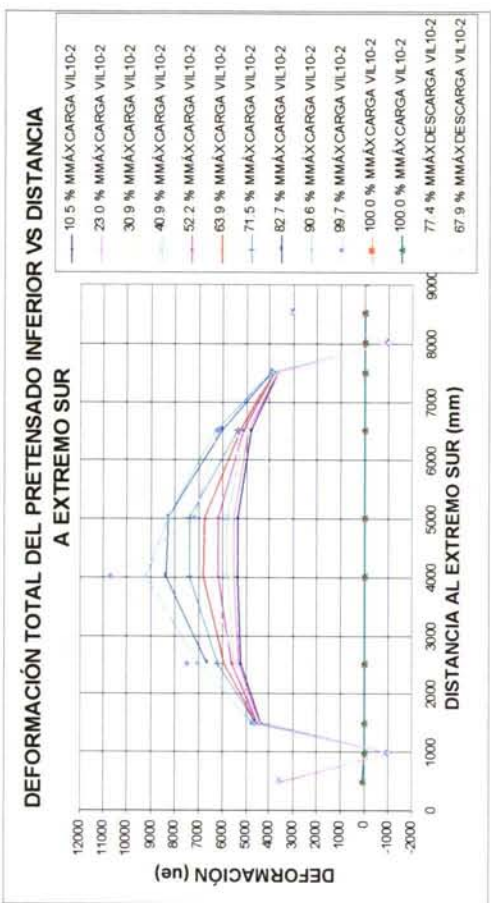
Gráfica 10.6.3.2-12



Gráfica 10.6.3.2-13



Gráfica 10.6.3.2-14



Gráfica 10.6.3.2-15

## 10.7. CONCLUSIONES OBTENIDAS DE LAS VIGAS ENSAYADAS

En este apartado se resumen los resultados de los ensayos realizados, relativos al comportamiento hasta rotura de las vigas ensayadas.

### 10.7.1. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS DATOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

En las Tablas 10.7.1-1 y 10.7.1-2 se resumen los resultados de los ensayos a flexión realizados, donde:

$\Delta\epsilon_{p,m\acute{a}x}^*$	variación de deformación máxima registrada en las galgas adheridas al alambre exterior del cordón de pretensado inferior, en la zona central
$\Delta\epsilon_{p,nec}^*$	variación de deformación del alambre necesaria, estimada en la zona central, para el pretensado alcance el límite elástico
$x$	distancia desde al extremo Sur a la galga considerada
$M_f$	momento flector de fisuración
$M_{m\acute{a}x}$	momento flector máximo detectado durante el ensayo
$M_{plas}$	momento flector de plastificación estimado
$L_e$	distancia entre el extremo de la viga y la carga aplicada más cercana ("embedment length")

En los resultados de varias de las vigas ensayadas se aprecia que, a pesar de la simetría inicial de las cargas puntuales aplicadas, durante el ensayo se detecta un aumento de la variación del pretensado inferior más acusada en uno de los lados de la viga.

Creemos que esto puede ser debido a que, cuando se produce la plastificación del pretensado de la zona central se genera una rótula parcialmente plástica en la viga, con una cierta rigidez al giro debido a que el hormigón todavía resiste. A partir de ese instante se produce una pérdida de rigidez y, por lo tanto, un aumento de la deformabilidad de la viga en la zona localizada, hasta que se produce el agotamiento del hormigón a compresión, lo que desencadena el colapso de la viga. Esto se ha observado en las vigas V6L10-1, V4C, V3L10-2, V6C y V1L10-2.



Tabla 10.7.1-1

Viga	Armadura conformiento	Tiempo transcurrido desde la transferencia	$f_{c, cub}$	$f_{c, cil}$	$E_c$	$M_{II}$ teórico	$M_{II}$ detectado	$M_{II}$ 0.003	$M_{II}$ 0.0035	$M_{II}$ real	Peso	Densidad vigas HC	Máxima altura fisuras cara Este	Máxima altura fisuras cara Oeste	Separación fisuras	Abertura máxima detectada	Flecha máxima	Mureal/Muteo
V6L10-1	c 6 a 10	56	63	58	19413	125	125-140	263	274	297	14.24	0.76	21	20	8-20	0.3-0.4	126.9	1.08
V12L10-1	c 8 a 20	63	64	59	18770	125	110/160	264	275	281	14.78	0.79	27	26	8-15	0.3-0.4	130.5	1.02
V10L10-1	c 6 a 15	139	71	59	20598	127	90/110	263	274	294	14.80	0.79	22	28	6-20	0.3-0.4	123.6	1.07
V7L10-1	c 8 a 15	293	68	61	20040	134	99/115	263	274	288	14.79	0.79	23	24	6-14	0.4-0.5	123.6	1.05
V4C	c 8 a 15	49	69	69	30509	125		289	293	>304	18.74	1	23	23	10-15	0.3-0.4	>123.8	1.04
V3L10-2	c 8 a 15	55	89	66	27957	120	119/125	273	282	307	16.47	0.88	23	22	7-16	0.4	145.0	1.09
V6C	c 8 a 15	76	74	73	31840	124	140/150	291	296	>314	18.77	1	29	29	8-19	0.5	>200.1	1.06
V1L10-2	c 8 a 15	90	72	69	27517	127	120/125	274	284	304	16.49	0.88	29	29	8-14	0.3-0.4	139.6	1.07

Tabla 10.7.1-2

Viga	Edad viga	Aconf	$L_s$	$M_{II}$ detectado medio	$M_{II}$ detectado	Flecha máxima	$M_{II}$ teórico	$\Delta \varepsilon_{p, sec}$ relación 1	$\Delta \varepsilon_{p, sec}$ relación 2	$\Delta \varepsilon_{p, max}^*$	Plastificación del pretensado	Tipo de rotura	Deslizamiento Sur	Deslizamiento Norte	Deslizamiento de galgas cable centrales	Pendiente	$\Delta \varepsilon_p - M$	Pendiente	Longitud de anclaje
	Días		m	mkN	mkN	mm	mkN	ue	ue	ue						$M - \Delta$	$\Delta \varepsilon_p - M$	$m - \chi$	m
V6L10-1	56	c 6 a 10	4	125	297	127	274	4225	4304	4400	SI	RD	DD	DD	SI	$\ell$	Normal	Normal	$I_{apd} \approx 4$
V12L10-1	63	c 8 a 20	4	110	281	130	271	3651	3718	3100	?	DU	DD	DD	NO	$\ell$	Normal	Normal	$I_{apd} \leq 4$
V10L10-1	139	c 6 a 15	4	90	294	124	263	4207	4285	2500	?	DU	DD	DD	SI	Baja	Alta	Normal	$I_{apd} \approx 4$
V7L10-1	293	c 8 a 15	4	110	288	111	262	4048	4123	3300	?	DU	DD	DD	SI	Normal	Alta	Normal	$I_{apd} \approx 4$
V4C	49	c 8 a 15	3.5	—	>303	>124	267	3662	3730	5500	SI	RD	NID	NID	$\ell$	Baja	Alta	—	$I_{apd} < 3.5$
V3L10-2	55	c 8 a 15	3.5	120	307	145	265	3919	3992	7500	SI	RD	NID	NID	NO	Baja	Alta	Baja	$I_{apd} < 3.5$
V6C	76	c 8 a 15	2.75	146-157	>314	>200	267	3839	3910	8800	SI	RD	NID	NID	NO	Baja	Alta	Baja	$I_{apd} < 2.75$
V1L10-2	90	c 8 a 15	3.25	120-125	304	140	265	3829	3900	5500	SI	RD	NID	NID	NO	Baja	Alta	Baja	$I_{apd} < 3.25$

### 10.7.2. TIPOS DE ROTURA DETECTADOS

- A partir de los valores estimados de la fuerza de pretensado inferior y superior, la resistencia a tracción, y los resultados de los ensayos de probetas de hormigón, correspondientes a la edad de ensayo, se determinó el diagrama momento-curvatura de cada viga hasta rotura. La rotura prevista para todas las vigas ensayadas era de tipo dúctil, debida al agotamiento a compresión del hormigón.
- El momento de fisuración detectado en las vigas durante el ensayo se ajusta al teórico, excepto en las vigas V7L10-1 y V10L10-1, para las que el momento de fisuración detectado fue considerablemente inferior (véase la Tabla 10.7.1-1). Estas vigas son las últimas que se ensayaron, por lo que las pérdidas de pretensado a la edad de ensayo eran superiores a las de las vigas de HL10-1 ensayadas previamente, lo que conduce a un momento de fisuración real menor. El cálculo del momento de fisuración teórico se efectuó a partir de la estimación de la fuerza de pretensado remanente: realmente las pérdidas deben haber sido superiores a las estimadas, probablemente debido a la fisuración por hendimiento. En el Anexo 7 se presentan los mapas de fisuración de las vigas ensayadas hasta rotura.
- Las vigas de hormigón convencional ensayadas experimentaron plastificación del pretensado inferior al final del ensayo, por lo que, aunque no llegaron a romper debido a las deformaciones excesivas, habrían experimentado rotura dúctil. El valor de momento máximo alcanzado durante el ensayo fue superior al momento nominal predicho por el diagrama momento-curvatura. La capacidad de deformación de las vigas de HC fue muy superior a la del resto de las vigas: la flecha máxima en centro luz alcanzó los 200 mm para la viga V6C sin haberse producido la rotura (véase la Tabla 10.7.1-2). La ductilidad de las vigas de este material es considerablemente superior a la de las vigas de HL10-1 y HL10-2.
- Las vigas de hormigón ligero HL10-2 ensayadas experimentaron rotura dúctil. La capacidad resistente de las vigas de HL10-2 fue superior a la nominal, a pesar de la fisuración por hendimiento. En ningún caso se produjo deslizamiento generalizado de todos los cordones.
- La rotura de la viga V6L10-1, primera viga ensayada de HL10-1, fue dúctil. La rotura del resto de las vigas de este material fue menos dúctil, si bien no se puede afirmar que fuese frágil. La capacidad resistente de las vigas de HL10-1, independientemente de la cuantía de armadura de confinamiento, fue superior a la nominal, a pesar de la fisuración por hendimiento.
- Tanto las vigas de HL10-1 como las vigas de HL10-2 ensayadas alcanzaron el momento flector nominal previsto, a pesar de la existencia de fisuración por hendimiento generalizada a lo largo de toda la viga. Esto parece indicar que en la parte central de la viga no se disipó de forma apreciable fuerza de pretensado a causa de la fisuración longitudinal, hasta la edad de ensayo. El que se haya alcanzado en todos los casos un momento último superior al previsto parece indicar que la rotura fue dúctil en todos los casos. De hecho, las flechas máximas alcanzadas en rotura en las vigas de HL10-1 estuvieron comprendidas entre 124 y 130 mm, y en las de HL10-2 entre 140 y 145 mm, un 10% superiores a las anteriores. Esta diferencia de flechas máximas puede ser debida a la mayor



resistencia a compresión del hormigón HL10-2, que proporciona una ductilidad superior a las vigas de este material. Los valores de flechas máxima y momento máximo registrado son lo suficientemente elevados para presumir rotura dúctil de todas las vigas ensayadas.

- El que el momento flector nominal sea inferior al momento flector máximo registrado en todas las vigas ensayadas puede ser debido a que la sección de hormigón comprimida alcanzase una resistencia superior a la resistencia del hormigón en probeta cilíndrica. Esto podría ser debido a una “esbeltez” menor de la parte de la sección comprimida, y al efecto de confinamiento de la armadura pasiva longitudinal superior y la armadura transversal.
- De todas formas, si se hubiese retrasado la edad de ensayo de las vigas de HL10-1 y HL10-2, con el tiempo podrían haberse producido pérdidas generalizadas de pretensado a toda la viga que fragilizaran el comportamiento seccional. A esto hay que añadir la posibilidad de que se produjese la corrosión debido a la presencia de las fisuras longitudinales, lo que conduciría a una menor seguridad estructural.

## **10.8. ACOTACIÓN DE LA LONGITUD DE ANCLAJE DEL PRETENSADO DE LOS MATERIALES ENSAYADOS**

Como resultado de los ensayos se deduce:

1. La longitud de anclaje de las vigas de HL10-1, fisuradas por hendimiento en toda su longitud, es de 4 metros como máximo, a la edad de ensayo de las vigas.
2. La longitud de anclaje de las vigas de HL10-2, fisuradas por hendimiento en toda su longitud, ensayadas a los tres meses de su fabricación no supera los 3.25 metros, a la edad de ensayo de las vigas.
3. La longitud de anclaje de las vigas de hormigón convencional, HC, ensayadas a los tres meses no supera los 2.75 metros, a la edad de ensayo de las vigas.

## *Capítulo 11*

# **ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS DE LOS DIFERENTES ENSAYOS**

### **11.1. INTRODUCCIÓN**

En este Capítulo se aborda el análisis comparativo de los resultados de los diferentes ensayos de adherencia realizados a lo largo de esta investigación: ensayos sobre la zona de transmisión y ensayos acerca de la zona complementaria a tracción de cordones de pretensado de 15.2 mm de diámetro.

También se plantea un método para la estimación de las longitudes de transmisión y complementaria a tracción, que se basa en los resultados obtenidos en los ensayos de adherencia en pórtilo. Finalmente se comparan las predicciones de este método con los resultados experimentales obtenidos y con las predicciones de varias de las normativas y formulaciones expuestas en el Capítulo 2.

Para realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos acerca de la zona de transmisión, tendremos en cuenta:

- Los resultados de los ensayos en prismas: se estimó la longitud de transmisión a diversas edades tras la transferencia, a partir de las medidas de deformación manuales con extensómetro mecánico (Capítulo 8). Se emplearon dos métodos de evaluación de la longitud de transmisión: modelos lineal y exponencial.
- Los resultados de los ensayos realizados en vigas: se estimó la longitud de transmisión a partir de las medidas de deformación manuales con extensómetro mecánico (Capítulo 10). También se emplearon los dos métodos de evaluación de la longitud de transmisión planteados.
- Los resultados de los ensayos de simulación de la zona de transmisión en pórtilo (Capítulo 6). En los resultados de este ensayo se basa el método de acotación de la longitud de transmisión, que describiremos más adelante.

El análisis comparativo de los resultados de los ensayos de zona complementaria a tracción se realiza a partir de:

- Los resultados de los ensayos en pórtilo: ensayo de simulación de la zona complementaria a tracción. En los resultados de este ensayo se basa el método de acotación de la longitud complementaria a tracción, que describimos en un apartado posterior.



- Los resultados de los ensayos realizados en vigas: ensayos a flexión realizados aplicando dos cargas puntuales simétricas, centradas longitudinalmente en la viga. La finalidad de estos ensayos era analizar el comportamiento de las vigas a carga creciente hasta rotura, y acotar la longitud de anclaje del pretensado inferior.

Como ya se adelantó en el Capítulo 3, mediante este análisis comparativo se pretende valorar:

- La influencia del tipo de material en el comportamiento adherente.
- La influencia de la armadura de confinamiento en los valores de longitud de transmisión y penetración del cordón durante la transferencia.
- La adecuación de los ensayos de pórtico para predecir las longitudes de transmisión y complementaria a tracción.
- La tendencia a la fisuración diferida por hendidamiento de los elementos de hormigón ligero.
- La adecuación de los hormigones ligeros estudiados para anclar la fuerza de pretensado tras la transferencia, y para garantizar un comportamiento dúctil de las vigas pretensadas.
- La forma de crecimiento de las tensiones en el interior de la longitud de anclaje, durante el ensayo de carga centrada, a lo largo de las zonas de transmisión y complementaria a tracción.
- La adecuación de los métodos de estimación de la longitud de transmisión, lineal y exponencial planteados, a fin de determinar cuál de ellos proporciona valores de longitud de transmisión más ajustados a la realidad.
- La evolución de la longitud de transmisión de pretensado en los prismas y en las vigas fabricadas, para cada material. Con ello se pretende evaluar, para cada material, el efecto de la presencia y cuantía de armadura de confinamiento en los valores de las longitudes de transmisión.

La notación de la F.U.A. se incluye en el Apartado 6.1.

## 11.2. MÉTODO DE ACOTACIÓN DE LA LONGITUD DE ANCLAJE

Si consideramos una viga pretensada, transcurrido un cierto tiempo tras la transferencia, la fuerza de pretensado transferida en la zona central de la viga tendrá un valor  $P(t)$ .

En este apartado planteamos un modelo bilineal para la longitud de anclaje de cordones de pretensado de 15.2 mm de diámetro: la distribución de las tensiones en la longitud de transmisión y en la longitud complementaria se considera lineal en cada tramo. La fuerza de pretensado anclada corresponde al límite elástico garantizado del pretensado, puesto que en este trabajo nos hemos centrado en elementos pretensados diseñados en el dominio de rotura 3.

La longitud de anclaje del pretensado realmente variará con la edad, y consistirá en:

$$l_{bpd}(t) = l_{bpt}(t) + l_{bpc}(t) = \frac{P(t)}{\left[ \frac{\Delta P(t)}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,t}} + \frac{A_p f_{pyk} - P(t)}{\left[ \frac{\Delta P(t)}{\Delta x} \right]_{MAT,LC,t}}$$

donde:

$l_{bpd}(t)$	longitud de anclaje del límite elástico del pretensado, transcurrido un tiempo $t$ desde la transferencia
$l_{bpt}(t)$	longitud de transmisión de la fuerza de pretensado $P(t)$ , transcurrido un tiempo $t$ desde la transferencia
$l_{bpc}(t)$	longitud complementaria a tracción del límite elástico del pretensado, transcurrido un tiempo $t$ desde la transferencia
$P(t)$	fuerza de pretensado (F.U.A.) transferida en la zona central de la viga, transcurrido un tiempo $t$ desde la transferencia
$\left[ \frac{\Delta P(t)}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,t}$	fuerza unitaria adherente (F.U.A.) a lo largo de la longitud de transmisión, a la edad $t$
$A_p$	área del cordón de pretensado
$f_{pyk}$	límite elástico garantizado del cordón de pretensado
$\left[ \frac{\Delta P(t)}{\Delta x} \right]_{MAT,LC,t}$	fuerza unitaria adherente (F.U.A.) a lo largo de la longitud complementaria a tracción, a la edad $t$

En este documento diremos que un elemento pretensado presenta una longitud de transmisión convergente cuando están delimitadas las zonas extremas de transmisión, y la zona central de adherencia perfecta. En caso contrario, diremos que la longitud de transmisión es divergente (cuando desaparece la zona central). En este último caso, a causa de la fisuración se habrá producido una disipación de parte de la fuerza de pretensado a lo largo de todo el elemento.

El método que se plantea es válido para elementos que presenten longitudes de transmisión convergentes, que es el caso de las vigas ensayadas.

### 11.2.1. MÉTODO DE ACOTACIÓN DE LA LONGITUD DE TRANSMISIÓN

Para acotar la longitud de transmisión, necesitamos conocer la F.U.A. de la zona de transmisión:

$$l_{bpt} = \frac{P(t)}{\left[ \frac{\Delta P(t)}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,t}}$$

A partir de los resultados de los ensayos de simulación de la zona de transmisión en el pórtico, para cada material, a una edad de ensayo coincidente con la de transferencia se obtuvieron los siguientes valores:

$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,j,máx,AD}$	el máximo valor de la F.U.A. de la probeta en el ensayo de pórtico LT antes de producirse el deslizamiento generalizado, a la edad de transferencia, $j$
--	--



$$\left. \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,máx,j}$$

el máximo valor de la F.U.A. de la probeta en el ensayo de pórtico LT, tras producirse el deslizamiento generalizado: tras el deslizamiento generalizado de la probeta, se suele producir un descenso de la fuerza unitaria adherente. Se ha constatado que, a pesar del deslizamiento, el efecto conjunto de la adherencia mecánica y el rozamiento pueden producir la recuperación de la fuerza unitaria adherente hasta valores de F.U.A. incluso superiores al anterior (véase el Capítulo 6)

$$\left. \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,j,mín,DD}$$

el mínimo valor de la F.U.A. a lo largo de la probeta en el ensayo de pórtico LT durante el ensayo, tras haberse producido el deslizamiento generalizado. El ensayo se continúa hasta que se transfiere la totalidad de la fuerza superior

$$\left. \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,j,mín,DD,DIF}$$

si, una vez finalizado el ensayo, se mantiene durante un cierto tiempo la diferencia de carga residual entre la parte inferior y superior de la probeta en el ensayo de pórtico LT, se puede registrar un descenso de la F.U.A. debido al deslizamiento adicional diferido. De esta forma dispondremos de un valor de la F.U.A. mínima diferida

#### 11.2.1.1. Determinación de la cota superior de la longitud de transmisión

A partir del valor de la F.U.A. mínima, tras el deslizamiento generalizado, se puede acotar superiormente la longitud de transmisión a la edad de transferencia:

$$l_{bpt,máx}(j) = \frac{P_3}{\left. \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,j,mín,DD}}$$

donde:

$l_{bpt,máx}(j)$	cota superior de la longitud de transmisión, a la edad de transferencia
$P_3$	fuerza de pretensado tras las pérdidas instantáneas
$j$	edad de transferencia (días)

Hay que tener en cuenta que las condiciones en que se realiza el ensayo son favorables respecto a la adherencia ya que:

- La posición del cordón es vertical durante el hormigonado (situación de adherencia favorable).
- El recubrimiento es superior al que tiene el cordón en condiciones normales, por lo que el confinamiento es elevado. Prueba de ello es la ausencia de fallos por hendidamiento en todos los ensayos realizados.
- La velocidad de transmisión de carga es gradual.

Por ello habrá que introducir unos coeficientes correctores en la expresión de  $l_{bpt,máx}(j)$ . Se han correlacionado los resultados experimentales de longitud de transmisión a la edad de transferencia, en prismas y vigas, con los de la expresión de la cota superior de la longitud de transmisión planteada. El ajuste obtenido es mejor si se le aplican a la expresión anterior unos coeficientes correctores basados en el Código Modelo (CM90)

y en nuestra experiencia. Por esto se plantean los coeficientes correctores de las Tablas 11.2.1.1-1 y 11.2.1.1-2.

Tabla 11.2.1.1-1: Coeficiente de corrección  $\pi_1$  según la situación frente a la adherencia

Coeficiente corrector que tiene en cuenta la situación respecto a la adherencia	Favorable/ Desfavorable	$\pi_1$
Inclinación de menos de 45° respecto a la horizontal, en los que el espesor de hormigón fresco debajo del cordón considerado sea superior a 250 mm o que estén situados a menos de 300 mm por debajo del punto más alto de sección	Desfavorable	1.43
Cordones situados en zonas de compactación deficiente	Desfavorable	1.43
Demás casos	Favorable	1.0

Tabla 11.2.1.1-2: Coeficiente de corrección  $\pi_2$  según la forma de transferencia

Forma de transferir el pretensado	$\pi_2$
Transferencia gradual	1
Transferencia súbita	1.25

Cuando se produce la F.U.A. mínima,  $\left. \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,e,min,DD}$  ya se ha producido el deslizamiento generalizado, por lo que el efecto de confinamiento se ve mermado en gran medida. Por este motivo no se introducirá coeficiente corrector.

De esta forma, la cota superior de la longitud de transmisión tras la transferencia se estima de la siguiente forma:

$$l_{bpt,m\acute{a}x}(j) = \pi_1 \pi_2 \frac{P_3}{\left. \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,j,min,DD}}$$

donde:

$l_{bpt,m\acute{a}x}(j)$  cota superior estimada para la longitud de transmisión, inmediatamente tras la transferencia

### 11.2.1.2. Determinación de la cota inferior de la longitud de transmisión

A partir del valor de la F.U.A. máxima se obtiene:

$$l_{bpt,m\acute{i}n}(j) = \frac{P_3}{\left. \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,j,m\acute{a}x}}$$

$l_{bpt,m\acute{i}n}(j)$  cota inferior estimada para la longitud de transmisión, inmediatamente tras la transferencia

De esta forma, se deduce una cota inferior de la longitud de transmisión a la edad de transferencia, que servirá para estimar las tensiones transversales máximas en la zona de anclaje. Así se puede prever la aparición de fisuración en la zona de transmisión, y dimensionar la armadura de confinamiento correspondiente para limitar su aparición.



Como se ha visto en el apartado anterior, las condiciones en que se realiza el ensayo son favorables respecto a la adherencia. Por esto estimamos que la F.U.A. máxima no precisa de ningún coeficiente corrector.

### 11.2.2. MÉTODO DE ACOTACIÓN DE LA LONGITUD COMPLEMENTARIA A TRACCIÓN

Tras el deslizamiento generalizado del cordón en la probeta, se produce un descenso paulatino de la fuerza unitaria adherente.

Como se explicó en los Capítulos 4 y 5, el ensayo se continúa hasta que se alcanza el límite elástico en la parte inferior de la probeta, o bien se alcanza una fuerza unitaria adherente constante (rozamiento residual). Una vez finalizado el ensayo, conviene dejar un cierto tiempo (días) la diferencia de carga entre la parte inferior y superior de la probeta, para evaluar los efectos diferidos.

Se han obtenido, en cada ensayo, los siguientes valores:

$\left. \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT.LC.j.máx.AD}$	F.U.A. máxima instantánea: valor máximo de la F.U.A. en la probeta en el ensayo de pórtico LC, antes de haberse producido el deslizamiento generalizado del pretensado a lo largo de la probeta. Este valor, en todos los ensayos realizados, es el máximo valor de la F.U.A. en todo el ensayo.
--	--

$\left. \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT.LC.j.mín.DD}$	F.U.A. mínima instantánea: valor mínimo de la F.U.A., tras haberse producido el deslizamiento generalizado en la probeta en el ensayo de pórtico LC, hasta la finalización del ensayo.
--	--

$\left. \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT.LC.j.mín.DD.DIF}$	F.U.A. mínima diferida: valor mínimo de la F.U.A., tras haberse producido el deslizamiento generalizado en la probeta en el ensayo de pórtico LC, hasta que se desmonte el ensayo.
--	--

Es generalmente aceptado que la F.U.A. de la zona de transmisión es superior a la F.U.A. de la zona complementaria a tracción (ACIC99) debido a que en esta última no se produce el efecto Hoyer y, por lo tanto, la adherencia mecánica es reducida. Esto se ha constatado en los ensayos de pórtico (véase Capítulo 6). Por ello la probabilidad de aparición de fisuración longitudinal en la longitud complementaria durante la sobrecarga accidental es reducida. Sin embargo, a medida que aparecen fisuras de flexión se ha detectado en ensayos hasta rotura la aparición y propagación de fisuras longitudinales de adherencia, debido al gradiente de la fuerza de pretensado a ambos lados de la fisura. Por ello, creemos que sería conveniente establecer una cota inferior de la longitud complementaria a tracción.

#### 11.2.2.1. Determinación de la cota superior de la longitud complementaria a tracción

A partir del valor de la F.U.A. mínima diferida obtenida en el ensayo LC, se puede estimar una cota superior de la longitud complementaria a tracción para procesos de carga rápida:

$$l_{bpc,m\acute{a}x}(t) = \frac{A_p f_{pyk} - P(t)}{\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LC,j,m\acute{in},DD}}$$

donde:

$l_{bpc,m\acute{a}x}(t)$  predicción de la longitud complementaria a tracción máxima, a la edad  $t$  (días), frente a cargas “instantáneas”

Hay que tener en cuenta que los valores máximos de la F.U.A. se producen para probetas con condiciones de adherencia favorables ya que:

- La posición es favorable respecto a adherencia.
- El ensayo es gradual.
- La edad de ensayo es diferente a la edad de puesta en carga: se ha decidido realizar el ensayo a la edad de transferencia, anterior a la edad real de puesta en carga. De todas formas, esto nos pone del lado de la seguridad para las cotas inferiores de la F.U.A. por preverse un crecimiento de las propiedades resistentes hasta los 28 días. En hormigones de endurecimiento rápido, como los estudiados en esta investigación, el aumento de resistencias a partir de los 2 o 3 días es reducido.

Por ello habrá que introducir unos coeficientes correctores a la expresión planteada. Se han aplicado los coeficientes correctores del CM-90 al método planteado, y la correlación obtenida con los resultados experimentales es aceptable. Por ello se propone el coeficiente corrector  $\pi_1$ , anteriormente definido en la Tabla 11.2.1.1-1.

Sería conveniente realizar una campaña de ensayos para determinar el efecto de las cargas permanentes aplicadas, y de las sollicitaciones repetidas y dinámicas.

Por haberse producido el deslizamiento generalizado, el efecto de confinamiento se ve mermado en gran medida, por lo que no se introducirá coeficiente corrector por este motivo.

De esta forma, la cota superior de la longitud complementaria a tracción se obtiene de la siguiente forma:

$$l_{bpc,m\acute{a}x}(t) = \pi_1 \frac{A_p f_{pyk} - P(t)}{\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LC,j,m\acute{in},DD}}$$

#### 11.2.2.2. Determinación de la cota inferior de la longitud complementaria a tracción

La F.U.A. máxima se evalúa a la edad de transferencia, por lo que, previendo un crecimiento de las características resistentes del hormigón, el valor correspondiente a la edad de servicio, cuando  $f_{cm,t} \geq f_{cm,j}$ , será superior. Sin embargo, al tener poca importancia la adherencia mecánica en esta zona estimamos que la variación será despreciable. Por esto adoptamos la F.U.A. máxima a la edad de transferencia, sin aplicar ningún coeficiente corrector. De esta forma:



$$l_{bpc,min}(t) = \frac{A_p f_{pyk} - P(t)}{\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LC,j,máx}}$$

$l_{bpc,min}(t)$  predicción de la longitud complementaria a tracción mínima, a la edad  $t$  (días)

El valor de la  $l_{bpc,min}(t)$  nos indica la susceptibilidad de la viga de presentar fisuración longitudinal por tensiones excesivas de adherencia entre fisuras consecutivas: cuanto menor sea este valor, mayor es la probabilidad de aparición de fisuras de adherencia durante la vida útil.

### 11.2.3. REFLEXIÓN ACERCA DE LA FISURACIÓN DIFERIDA POR HENDIMIENTO

Se adopta la hipótesis de que las tensiones de hendimiento son directamente proporcionales al coeficiente de Poisson del material, mientras el hormigón no ha fisurado.

Además se supone que estas tensiones de tracción son inversamente proporcionales a la longitud de transmisión: a menor longitud de transmisión, mayor gradiente de la fuerza de pretensado y, por lo tanto, mayores tensiones de hendimiento. Por esto, resultan directamente proporcionales a la F.U.A. de la zona de transmisión.

Consideremos la sección transversal como un cilindro de hormigón no fisurado de radio interno  $r$ , y radio externo  $c$  (recubrimiento del cordón considerado). De acuerdo a la variación de tensión del pretensado podemos aceptar que se produce una presión radial sobre el radio interior, de valor:

$$p = \frac{K \nu_{MAT}}{2\pi r} \left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,j,máx}$$

donde:

$r$	radio interior, a partir del cual el hormigón no está fisurado por tensiones circunferenciales
$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,j,máx}$	F.U.A. máxima en la zona de transmisión. Adoptamos el valor máximo previo al deslizamiento
$\nu_{MAT}$	módulo de Poisson del material
$K$	constante que depende principalmente de la forma de la sección, del diámetro del cordón de pretensado y del módulo de Poisson del acero

Considerando un estado de deformación plana en la sección transversal analizada, se originan unas tensiones circunferenciales variables entre el radio interno y el paramento, de valor máximo en el radio interno. Considerando que estas tensiones no han de superar la resistencia a tracción a largo plazo (teniendo en cuenta el cansancio del hormigón a tracción) en el radio interno, llegamos a:

$$\sigma_{c,tr,MAT} = \frac{r^2 + c^2}{c^2 - r^2} \frac{K v_{MAT}}{2\pi r} \frac{\Delta P}{\Delta x} \Bigg]_{MAT,LT,j,m\acute{a}x} = K^* v_{MAT} \frac{\Delta P}{\Delta x} \Bigg]_{MAT,LT,j,m\acute{a}x}$$

$$K^* v_{MAT} \frac{\Delta P}{\Delta x} \Bigg]_{MAT,LT,j,m\acute{a}x} < \alpha_{t,MAT,j} f_{ct,MAT,j}$$

donde:

$c$	recubrimiento, medido desde el c.d.g. del cordón de pretensado
$K^*$	coeficiente dimensional ( $l^1$ ) proporcional al coeficiente $k$ , que depende además del recubrimiento de la sección, del alcance de la zona fisurada, ...
$\sigma_{c,tr,MAT}$	tensión de tracción originada en la zona de transmisión de forma permanente
$f_{ct,MAT,j}$	resistencia a tracción del material, a la edad de transferencia, $j$ días
$\alpha_{t,MAT,j}$	coeficiente de cansancio a tracción del material, para cargas permanentes aplicadas a la edad de transferencia

No se tiene constancia de que los prismas de HC fabricados hayan presentado problemas de fisuración por hendimiento, tras transferir a los dos días del hormigonado. Por ello, damos por hecho que se cumple:

$$K^* v_{HC} \frac{\Delta P}{\Delta x} \Bigg]_{HC,LT,2,m\acute{a}x,AD} < \alpha_{t,HC,2} f_{ct,HC,2} \Rightarrow K^* < \frac{\alpha_{t,HC,2} f_{ct,HC,2}}{v_{HC} \frac{\Delta P}{\Delta x} \Bigg]_{HC,LT,2,m\acute{a}x,AD}}$$

Tampoco se detectó fisuración longitudinal en las vigas de HC, a la edad de transferencia de tres días. Por ello suponemos que se cumple:

$$K^* v_{HC} \frac{\Delta P}{\Delta x} \Bigg]_{HC,LT,3,m\acute{a}x,AD} < \alpha_{t,HC,3} f_{ct,HC,3} \Rightarrow K^* < \frac{\alpha_{t,HC,3} f_{ct,HC,3}}{v_{HC} \frac{\Delta P}{\Delta x} \Bigg]_{HC,LT,3,m\acute{a}x,AD}}$$

Para que no se originen tensiones de tracción en la zona de transmisión de elementos de hormigón ligero que sobrepasen la resistencia diferida de este material, ha de cumplirse a la edad de transferencia,  $j$ :

$$K^* v_{MAT} \frac{\Delta P}{\Delta x} \Bigg]_{MAT,LT,j,m\acute{a}x,AD} < \alpha_{t,MAT,j} f_{ct,MAT,j} \Rightarrow K^* < \frac{\alpha_{t,MAT,j} f_{ct,MAT,j}}{v_{MAT} \frac{\Delta P}{\Delta x} \Bigg]_{MAT,LT,j,m\acute{a}x,AD}}$$

Si adoptamos la hipótesis del mismo valor de  $K^*$  para los elementos de ambos materiales, esto implica suponer que el alcance de la zona fisurada (definido por el radio



$r$ ) es el mismo para ambos materiales. En este caso, una condición suficiente para que no se produzca fisuración sería:

$$\min \left( \frac{\alpha_{t,HC,2} f_{ct,HC,2}}{\left[ \nu_{HC} \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC,LT,2,máx,AD}}, \frac{\alpha_{t,HC,3} f_{ct,HC,3}}{\left[ \nu_{HC} \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC,LT,3,máx,AD}} \right) < \frac{\alpha_{t,MAT,j} f_{ct,MAT,j}}{\left[ \nu_{MAT} \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,j,máx,AD}}$$

En nuestro caso la condición más limitante es:

$$\frac{\alpha_{t,HC,3} f_{ct,HC,3}}{\left[ \nu_{HC} \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC,LT,3,máx,AD}} < \frac{\alpha_{t,MAT,j} f_{ct,MAT,j}}{\left[ \nu_{MAT} \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,j,máx,AD}}$$

De esta expresión se puede obtener la condición suficiente que ha de cumplir la resistencia a tracción a la edad de transferencia  $j$  del material MAT:

$$f_{ct,MAT,j} > \frac{\alpha_{t,HC,3} \nu_{MAT}^{máx} \left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,j,máx,AD}}{\alpha_{t,MAT,j} \nu_{HC}^{med} \left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{HC,LT,3,máx,AD}} f_{ct,HC,3}$$

donde, como se ve, para una mayor seguridad, se considera el coeficiente de cansancio medio del HC, y el coeficiente cansancio máximo para el HL, proporcionados por la bibliografía:

$\nu_{HC}^{máx}$  módulo de Poisson máximo del HC (FOUR85a, FOUR85b)

$\nu_{HL}^{med}$  módulo de Poisson medio del HL (FOUR85a, FOUR85b)

Considerando los valores de las F.U.A. máximos de ambos materiales, antes del deslizamiento generalizado en la probeta de los ensayos de pórtico LT (Capítulo 6), obtenemos la Tabla 11.2.3-1:

Tabla 11.2.3-1

	Edad ensayo $j$	$\nu_{MAT}$	$f_{cm,j}$	$f_{ctm,j}$	$\alpha_{ct,j,MED}$	$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,j,máx,AD}$	$\frac{\alpha_{t,MAT,j} f_{ct,MAT,j}}{\left[ \nu_{MAT} \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LT,j,máx,AD}}$	$f_{ct,MAT,j}$ mínima necesaria	$\frac{f_{ctm,j}}{f_{ct,MAT,j}}$
	(días)		MPa	MPa	Medio	kN/m	1/mm	MPa	
HC	2	0.2	47.5	3.1	0.81	257.01	0.049	2.51	1.23
HL10-1	2	0.2	45.5	2.9	0.73	288.41	0.037	3.35	0.87
HL3-1	2	0.2	49	2.9	0.73	237.11	0.045	2.75	1.05
HC-3d	3	0.2	55	3.2	0.81	337.73	0.038	3.20	1.00
HL10-2	3	0.25	58	3.2	0.73	433.01	0.022	5.69	0.56

Se aprecia que todos los hormigones ligeros, excepto el HL3-1 presentan inseguridad frente a la fisuración (expresada por el cociente de la resistencia necesaria a tracción y

la resistencia media a tracción del material, menor que la unidad) por hendimiento. El único hormigón ligero que presenta seguridad teórica frente a la fisuración por hendimiento es el hormigón ligero HL3-1. Sin embargo, como es sabido, todos los prismas de hormigón ligero presentaron fisuración por hendimiento.

Por otra parte, paradójicamente el hormigón convencional presenta teóricamente una seguridad superior si la transferencia se produce a los tres días, que si se produce a dos días. Esto es debido al crecimiento de la F.U.A., que no está acompañado por un crecimiento parejo de la resistencia a tracción. De todas formas, ninguna de las vigas de HC presentó fisuración por hendimiento.

Según este análisis, el riesgo de fisuración es superior en el HL10-1 y en el HL10-2 que en el HL3-1, material que se presenta como el más apropiado para la realización de elementos pretensados.

Estos resultados contradictorios pueden ser debidos a:

- La dispersión debida al número reducido de ensayos en pórtico.
- La dispersión de los resultados de la resistencia a tracción, sobre todo en el hormigón convencional.
- La diferencia de recubrimiento entre los ensayos de pórtico y los prismas y vigas fabricadas.
- Hay que tener en cuenta que los valores de la F.U.A. deducidos, relativos a la ausencia de deslizamiento generalizado, corresponden a una longitud adherente de 30 cm, la altura de una probeta cilíndrica normalizada. El valor de la F.U.A. variará dependiendo de la longitud adherente, debido a la diferente distribución de tensiones de adherencia dentro de la zona adherente.
- Se han adoptado los valores del coeficiente de cansancio a tracción de cada tipo de material de la bibliografía (FOUR85a, FOUR85b). Sería necesario determinar experimentalmente los valores propios de los tipos de hormigón ensayados, en diferentes condiciones ambientales.

### **11.3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PÉRDIDAS DE PRETENSADO INSTANTÁNEAS: PRISMAS Y VIGAS**

En este apartado se realiza una comparación de la fuerza de pretensado antes y tras la transferencia en los prismas y vigas.

El valor de la fuerza de pretensado antes de la transferencia se estimó directamente con las medidas de las células de carga huecas interpuestas entre las cuñas de anclaje y los terminales de la bancada.

El valor de la fuerza de pretensado inmediatamente tras la transferencia se determinó a partir de las variaciones de deformación del pretensado medidas a través de las galgas extensométricas adheridas a un alambre exterior del cordón de pretensado. Estas galgas se calibraron con las células de carga durante el tesado.



En la Tabla 11.3-1 aparecen los valores de la fuerza de pretensado inicial,  $P_0$ , y los valores de la misma correspondientes al momento anterior y posterior a la transferencia,  $P_2$  y  $P_3$  respectivamente. En el caso de los prismas, se incluyen los datos en las columnas correspondientes al pretensado inferior, si bien existe un sólo cordón de pretensado centrado. En esta tabla se reflejan también los valores de pérdidas de pretensado reales y “teóricos”, calculados a partir de la fuerza de pretensado, y las propiedades del hormigón determinadas experimentalmente a la edad de transferencia.

Se observa que las pérdidas de pretensado instantáneas en los prismas y las vigas son similares.

Se aprecia una gran dispersión de las pérdidas respecto a las teóricas. Esto es debido en parte a que las pérdidas se han estimado con el módulo de deformación secante, no con el módulo de deformación de la rama noval. Aparte hay que tener en cuenta la incertidumbre de las medidas de la instrumentación, la heterogeneidad del material, y los efectos dinámicos durante la transferencia.

La variación entre los valores “reales” y los “teóricos” se define como:

$$VAR_{P_3}(\%) = abs \left( 1 - \frac{\frac{\Delta P_3}{P_2}}{\frac{\Delta P_{3,teo}}{P_{2,teo}}} \right) \cdot 100$$

donde:

$VAR_{P_3}(\%)$	variación entre el valor experimental y la predicción de la fuerza de pretensado $P_3$ tras pérdidas instantáneas
$abs(z)$	valor absoluto de $z$
$P_2$	fuerza de pretensado inmediatamente antes de la transferencia, experimental
$P_3$	fuerza de pretensado inmediatamente antes de la transferencia, estimada a partir de las medidas experimentales
$\Delta P_3$	pérdidas de pretensado teóricas debidas al acortamiento elástico, estimadas a partir de los valores experimentales de $P_2$ y de $P_3$
$P_{2,teo}$	fuerza de pretensado teórica inmediatamente antes de la transferencia
$\Delta P_{3,teo}$	pérdidas de pretensado debidas al acortamiento elástico, estimadas a partir del valor de $P_2$ , del valor del módulo de deformación secante experimental a la edad de transferencia, $E_{cm,j}$ , y del peso propio de las vigas

En la Tabla 11.3-1 se aprecian variaciones de hasta el 67% en la estimación de las pérdidas instantáneas del pretensado superior respecto a las predicciones teóricas. La variación media es del 22.5% para el pretensado inferior y del 57% para el pretensado superior (del que se dispone de menos medidas). En los prismas, se aprecia que las dispersiones son más reducidas, del 8% de media.

Tabla 11.3-1: Comparación entre las pérdidas instantáneas de pretensado entre los prismas y las vigas

	$P_{0,inf}$	$P_{0,sup}$	$\frac{\Delta P_{2,inf}}{P_0}$	$\frac{\Delta P_{2,sup}}{P_0}$	$P_{2,inf}$	$P_{2,sup}$	$E_{cm,j}$	$\rho$	$P_{3,inf}$	$P_{3,sup}$	$\frac{\Delta P_{3,teo,inf}}{P_{2,teo,inf}}$	$\frac{\Delta P_{3,teo,sup}}{P_{2,teo,sup}}$	$\frac{\Delta P_{3,inf}}{P_{2,inf}}$	$\frac{\Delta P_{3,sup}}{P_{2,sup}}$	$VAR_{f_{3,inf}}$	$VAR_{f_{3,sup}}$
<b>Prisma /Viga</b>	kN	kN	%	%	kN	kN	MPa	kN/m <sup>3</sup>	kN	kN	%	%	%	%	%	%
P1L10-1					189.1		19640		167.3		11.5		9.8		15	
P2L10-1					188.9		20687		168.1		11.0		11.9		8	
P3L10-1					189.6		20985		169.0		11.9		11.5		4	
P1L3-1					188.2		20270		167.1		11.2		12.3		10	
P2L3-1					189.9		20645		168.9		11.1		8.6		22	
P3L3-1					190.6		21128		170.0		11.9		11.7		2	
P3C					192.1		31153		177.5		7.7		8.0		4	
P4C					193.0		31103		178.3		7.8		7.8		0	
V1L10-1	195.9	199.4	3.7	5.6	188.6	188.3	19500	16.9	168.7	183.7	11.5	2.5	11.2		3	
V2L10-1	195.9	199.4	3.7	5.6	188.6	188.3	19500	16.9	168.2	184.1	11.8	2.2	9.8		9	
V3L10-1	195.9	199.4	3.7	5.6	188.6	188.3	19500	16.9	168.7	183.7	11.6	2.5	9.6		9	
V4L10-1	195.9	199.4	3.7	5.6	188.6	188.3	19500	16.9	168.7	183.7	11.6	2.4	9.7		8	
V5L10-1	195.9	199.4	3.7	5.6	188.6	188.3	19500	16.9	166.5	185.5	11.7	1.5				
V1L10-2	201.2	196.5	5.1	4.1	190.9	188.4	27230	18.6	176.0	184.8	7.8	1.9	12.1	3.2	56	64
V2L10-1	201.2	197.5	5.1	4.1	190.9	189.4	27230	18.6	176.0	185.8	7.8	1.9	9.4	2.4	20	23
V3L10-2	201.2	198.5	5.1	4.1	190.9	190.4	27230	18.6	176.0	186.7	7.8	1.9	8.1	0.5	4	73
V4C	201.2	199.5	5.1	4.1	190.9	191.4	28094	21.6	176.7	187.6	7.4	2.0	12.7	3.1	72	57
V5C	201.2	200.5	5.1	4.0	190.9	192.4	28094	21.6	176.7	188.5	7.4	2.0	8.3	3.4	12	67
V6C	201.2	201.5	5.1	4.0	190.9	193.4	28094	21.6	176.8	189.5	7.4	2.0	9.8		32	



## 11.4. DEDUCCIÓN DE LA LONGITUD DE TRANSMISIÓN A PARTIR DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 11.4.1. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS LINEAL Y EXPONENCIAL DE DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD DE TRANSMISIÓN

Los métodos lineal y exponencial de estimación de la longitud de transmisión se han aplicado a los mismos datos experimentales, correspondientes a los prismas (Capítulo 8) y a las vigas (Capítulo 10). El objetivo de este apartado es averiguar cuál de los métodos es más apropiado para:

- Determinar la longitud de transmisión de elementos que no presentaron fisuración por hendimiento.
- Determinar la longitud de transmisión de elementos que presentaron fisuración por hendimiento, mientras las longitudes de transmisión sean convergentes. En la bibliografía no se ha encontrado referencia alguna al estudio del crecimiento longitudinal de la fuerza de pretensado en este caso.

Para evaluar la adecuación de cada método de estimación de la longitud de transmisión, nos basamos en:

- La comparación de los valores de longitud de transmisión proporcionados para cada elemento, a diversas edades, en cada una de las caras laterales: cara Este y cara Oeste. Un buen método habrá de presentar resultados similares para los valores de la longitud de transmisión, determinados en ambas caras laterales de los prismas.
- La evaluación de qué método presenta un valor de  $R^2$  más elevado en la zona de transmisión de un determinado prisma, a cada edad. De esta forma se puede valorar qué método resulta más adecuado para cada material, y en función del extremo: más próximo (A.A.) o más alejado (A.P.) de la zona de corte.

Por lo que respecta a las vigas, debido a la escasez de datos en los extremos no consideramos estos elementos a la hora de comparar los métodos lineal y exponencial.

#### 11.4.1.1. Comparación de la longitud de transmisión de las caras Este y Oeste en los prismas para ambos métodos

En la Gráfica 11.4.1.1-1 figuran los valores de la longitud de transmisión de la cara Oeste respecto a los valores de la cara Este de todos los prismas, aplicando el método lineal<sup>11.1</sup>. El coeficiente  $R^2$  es de 0.93. La ecuación de la recta de regresión difiere ligeramente de la de la bisectriz (recta ideal). Las diferencias en las estimaciones de los valores de longitud de transmisión en ambas caras, en un mismo extremo de cada elemento pueden ser debidas a:

- La imprecisión intrínseca de las medidas manuales.
- La posible excentricidad accidental del cordón en la sección transversal, a pesar del control exhaustivo de centrado durante la fabricación de los prismas.

<sup>11.1</sup> No se han incluido los valores que corresponden a longitudes de transmisión divergentes, es decir, cuando no se produce zona central horizontal (véase Capítulo 8).



- La heterogeneidad del hormigón: las diferencias locales de módulo de deformación introducen una asimetría en la sección transversal, por lo que aparece una cierta excentricidad de la fuerza de pretensado tras la transferencia, que puede generar flexión lateral.
- La curvatura del cordón de pretensado, debida al “vicio” introducido por el almacenamiento del cordón en rollos, o eventualmente a una ligera curvatura del costero del encofrado.
- La falta de precisión de la estimación de la longitud de transmisión en las vigas, debido al escaso número de medidas de deformación del hormigón en las zonas de transmisión de las vigas, donde el gradiente de deformación es más elevado (a veces, tras la criba de datos sólo se dispone de tres valores).

El método exponencial se ha aplicado tentativamente a las medidas de deformación manuales (Capítulos 7 y 9), en un intento de profundizar en la zona de transmisión: la función exponencial aparece como solución de la ecuación diferencial de la adherencia, para determinadas condiciones de contorno. Estas corresponden a la hipótesis de confinamiento perfecto del cordón de pretensado (hormigón infinitamente rígido). También resulta una solución de tipo exponencial asumiendo un confinamiento elástico del hormigón sobre el cordón (hormigón considerado como un material elástico, con ausencia de fisuración por tracciones circunferenciales excesivas).

En la Gráfica 11.4.1.1-2 se presentan los resultados del ajuste exponencial, de los que se han deducido los datos discordantes. Se aprecia que el valor de  $R^2$  para la relación entre las caras Este y Oeste es de 0.91, ligeramente inferior al que presenta el método lineal (Gráfica 11.4.1.1-1). Por lo tanto, el ajuste exponencial presenta un grado de ajuste similar al lineal para calcular la longitud de transmisión.

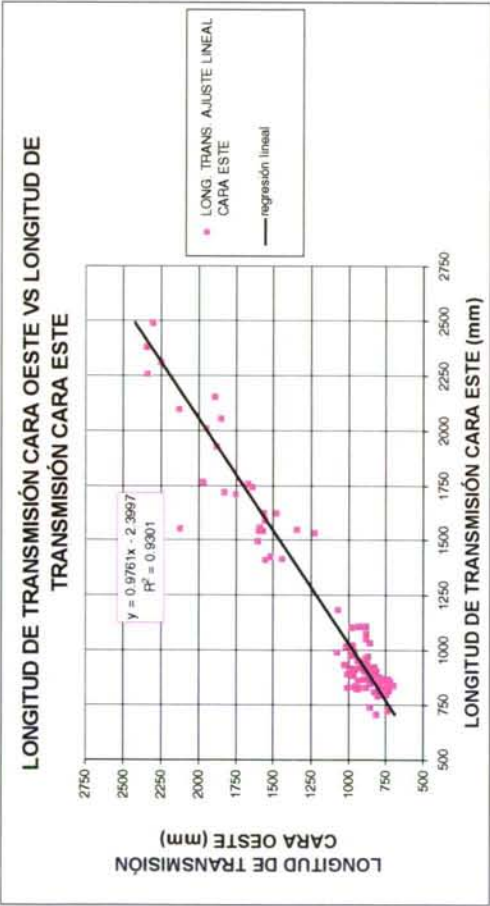
En las Gráficas 11.4.1.1-3 y 11.4.1.1-4 se presenta la correlación entre los datos proporcionados por el ajuste exponencial, y los valores proporcionados por el ajuste lineal, para los diversos prismas y a las distintas edades. La Gráfica 11.4.1.1-3 corresponde a las medidas del extremo activo, y la Gráfica 11.4.1.1-4 a las del extremo pasivo. En el extremo activo se observa que la recta de regresión se aleja de la bisectriz, si bien el coeficiente  $R^2$  es elevado. En el extremo pasivo, en el que el efecto dinámico está más amortiguado, la recta de regresión se aproxima a la bisectriz, y el coeficiente  $R^2$  es superior, de 0.97.

En la Gráfica 11.4.1.1-5 se aprecia la correlación entre los resultados de las longitudes de transmisión de la cara Este respecto a los de la cara Oeste, para los prismas de hormigón convencional. Se aprecia que el modelo lineal presenta un ajuste mejor que el exponencial, si bien ambos métodos presentan un valor de  $R^2$  muy reducido, debido al escaso número de datos.

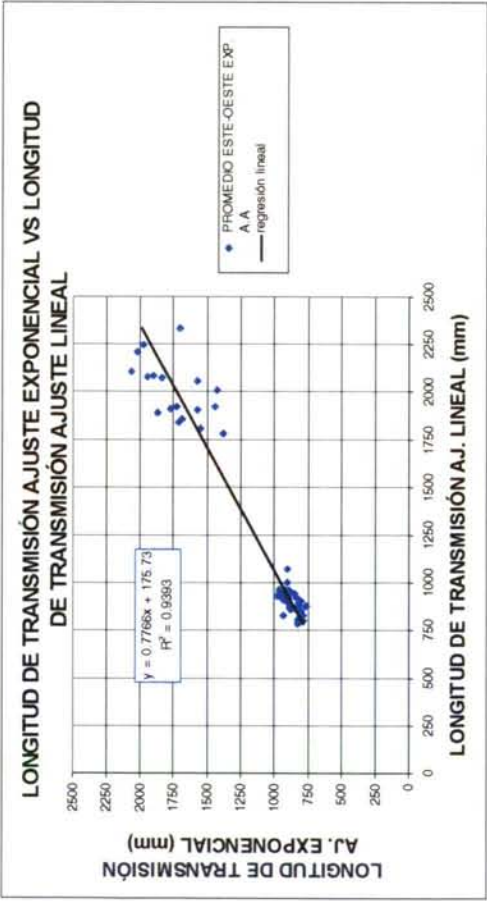
En la Gráfica 11.4.1.1-6 se aprecia la correlación entre los resultados de las longitudes de transmisión de la cara Este respecto a los de la cara Oeste, para los prismas de hormigón ligero. Se aprecia que el modelo exponencial presenta un valor de  $R^2$  similar al lineal, de 0.93 y 0.94 respectivamente.

Como conclusión de este análisis se puede resaltar que el método exponencial presenta un grado de ajuste similar al del método lineal para estimar longitudes de transmisión “convergentes” en elementos de hormigón ligero. Sin embargo, en elementos de hormigón convencional parece más adecuado el método lineal, si bien se hace necesario efectuar una investigación más exhaustiva.

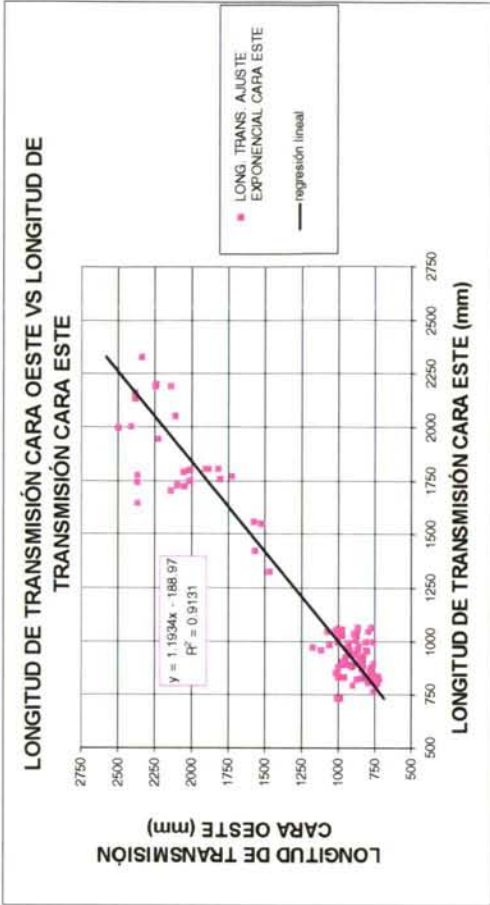




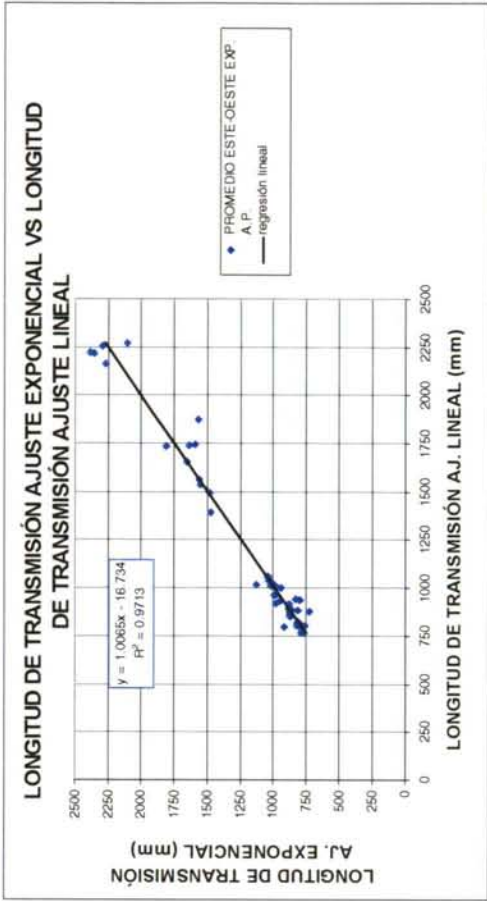
Gráfica 11.4.1.1-1



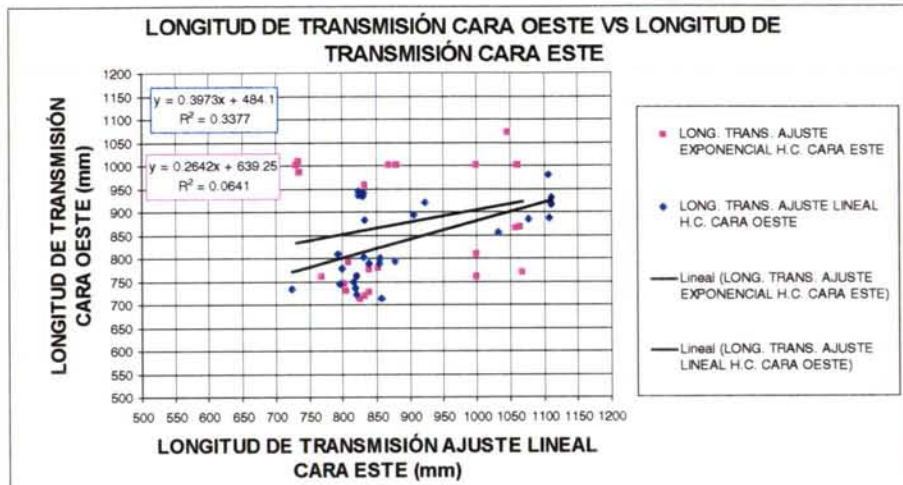
Gráfica 11.4.1.1-3



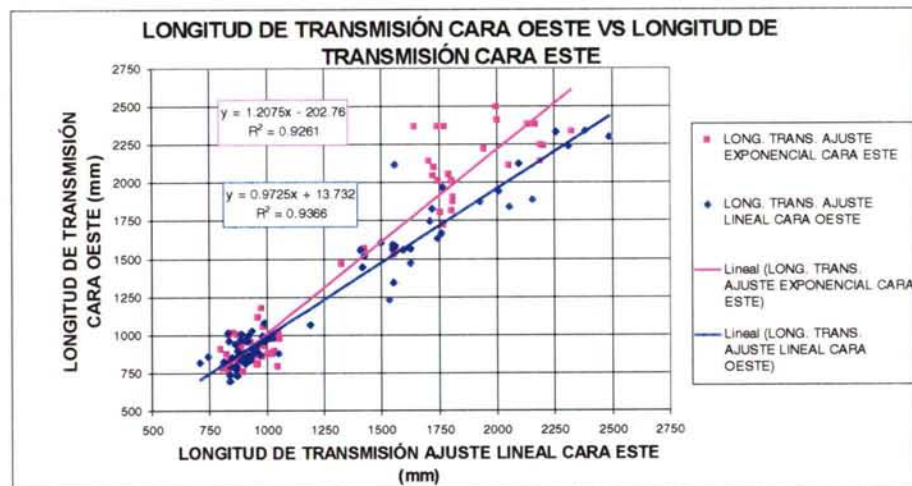
Gráfica 11.4.1.1-2



Gráfica 11.4.1.1-4



Gráfica 11.4.1.1-5



Gráfica 11.4.1.1-6

#### 11.4.1.2. Comparación de los valores de $R^2$ de la zona de transmisión de los prismas para ambos métodos

En las Tablas 11.4.1.2-1 y 11.4.1.2-2 se presenta un resumen de los ajustes que presentaron un coeficiente  $R^2$  superior de los extremos activo y pasivo, en las caras Este y Oeste respectivamente. En la Tabla 11.4.1.2-3 se presenta un resumen global de cada prisma y de cada material, según el siguiente criterio: se acuerda que el ajuste es de un tipo (exponencial o lineal) cuando el coeficiente  $R^2$  de la zona de transmisión proporcionado por dicho método es superior en ambas caras. El ajuste es dudoso cuando en cada cara predomina un tipo de ajuste:

EXP. ajuste exponencial  
 LIN. ajuste lineal  
 DUD. ajuste dudoso

Se observa que el ajuste exponencial predomina en ambos extremos, en todos los prismas de hormigón ligero. Sin embargo, en el caso de los prismas de HC, no predomina ninguno de los ajustes sobre el otro, o bien, en contados casos, predomina el exponencial (Tabla 11.4.1.2-3).



Tabla 11.4.1.2-1: Resumen cara Este

Este		(0 d)	(1 s)	(1 mes)	(3 meses)	(6 meses)	(1 año)
P11.10-1	L11	EXP.	LIN.	LIN.	EXP.	EXP.	EXP.
	L12	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.
P21.10-1	L11	EXP.	EXP.	LIN.	EXP.	EXP.	EXP.
	L12	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.
P31.10-1	L11	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	LIN.	EXP.
	L12	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	LIN.
P11.3-1	L11	LIN.	EXP.	EXP.	LIN.	EXP.	EXP.
	L12	LIN.	EXP.	EXP.	LIN.	EXP.	EXP.
P21.3-1	L11	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	LIN.	LIN.
	L12	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.
P31.3-1	L11	EXP.	LIN.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.
	L12	EXP.	LIN.	EXP.	EXP.	EXP.	LIN.
P3C	L11	LIN.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	LIN.
	L12	LIN.	EXP.	LIN.	EXP.	EXP.	EXP.
P4C	L11	EXP.	EXP.	LIN.	EXP.	LIN.	LIN.
	L12	LIN.	LIN.	EXP.	LIN.	EXP.	EXP.

Tabla 11.4.1.2-2: Resumen cara Oeste

Oeste		(0 d)	(1 s)	(1 mes)	(3 meses)	(6 meses)	(1 año)
P11.10-1	L11	LIN.	EXP.	EXP.	LIN.	EXP.	EXP.
	L12	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.
P21.10-1	L11	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.
	L12	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.
P31.10-1	L11	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.
	L12	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	LIN.	EXP.
P11.3-1	L11	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.
	L12	LIN.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.
P21.3-1	L11	EXP.	EXP.	LIN.	EXP.	EXP.	EXP.
	L12	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	LIN.	LIN.
P31.3-1	L11	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.
	L12	EXP.	LIN.	EXP.	LIN.	EXP.	LIN.
P3C	L11	EXP.	EXP.	LIN.	EXP.	EXP.	EXP.
	L12	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.
P4C	L11	LIN.	EXP.	LIN.	LIN.	LIN.	LIN.
	L12	LIN.	LIN.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.

Tabla 11.4.1.2-3: Resumen global por prismas y por material

		(0 d)	(1 s)	(1 mes)	(3 meses)	(6 meses)	(1 año)
P1L10-1	L.T1	DUD.	DUD.	DUD.	DUD.	EXP.	EXP.
	L.T2	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.
P2L10-1	L.T1	EXP.	EXP.	DUD.	EXP.	EXP.	EXP.
	L.T2	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.
P3L10-1	L.T1	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	DUD.	EXP.
	L.T2	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	DUD.	DUD.
H1L10-1	L.T1	EXP.	EXP.	DUD.	EXP.	EXP.	EXP.
	L.T2	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.
P1L3-1	L.T1	DUD.	EXP.	EXP.	DUD.	EXP.	EXP.
	L.T2	LIN.	EXP.	EXP.	DUD.	EXP.	EXP.
P2L3-1	L.T1	EXP.	EXP.	DUD.	EXP.	DUD.	DUD.
	L.T2	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	DUD.	DUD.
P3L3-1	L.T1	EXP.	DUD.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.
	L.T2	EXP.	LIN.	EXP.	DUD.	EXP.	LIN.
H1L3-1	L.T1	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.	EXP.
	L.T2	EXP.	EXP.	EXP.	DUD.	EXP.	DUD.
P3C	L.T1	DUD.	EXP.	DUD.	EXP.	EXP.	DUD.
	L.T2	DUD.	EXP.	DUD.	DUD.	EXP.	EXP.
P4C	L.T1	DUD.	EXP.	LIN.	DUD.	LIN.	LIN.
	L.T2	LIN.	LIN.	DUD.	DUD.	EXP.	EXP.
HC	L.T1	DUD.	EXP.	DUD.	DUD.	DUD.	DUD.
	L.T2	DUD.	DUD.	DUD.	DUD.	EXP.	EXP.



En los siguientes apartados, a fin de efectuar el análisis comparativo, se adopta el método lineal debido a que:

- Los resultados de longitud de transmisión proporcionados por ambos métodos son similares (Gráficas 11.4.1.2-3 y 11.4.1.2-4).
- La determinación de la longitud de transmisión de las investigaciones previas (todas las referencias de que se dispone son relativas a hormigón convencional) se realizó en todos los casos estudiados mediante un ajuste lineal. En este capítulo se aborda un análisis comparativo con las formulaciones de varias normativas y con los resultados de varias investigaciones previas.
- El modelo planteado en este capítulo adopta como hipótesis el crecimiento lineal de la fuerza de pretensado a lo largo de la longitud de transmisión.

A la vista de las medidas de deformación manuales se aprecian tramos de diferente curvatura en las zonas extremas de los prismas. Ni las curvas exponenciales ni las rectas contienen puntos de inflexión, por lo que la precisión del ajuste es limitada.

#### 11.4.1.3. Valoración crítica de ambos métodos: lineal y exponencial

Los métodos tradicionalmente empleados para estimar la longitud de transmisión, a partir de las medidas de deformación en el hormigón, descritos en el Capítulo 2, se basan en:

1. La delimitación “a estima” de la zona central de la viga, y de las zonas de transmisión.
2. La determinación de la deformación media de la zona central de la viga,  $\varepsilon_{c,m}$ , o el valor  $\frac{X}{100} \varepsilon_{c,m}$ , donde  $X$  es típicamente 90 o 95.
3. La estimación, bien aplicando regresión lineal a cada una de las zonas laterales, o estableciendo el punto en que se alcanza el valor de la deformación obtenida en el punto 2, de la longitud de transmisión de cada extremo.

Las objeciones a este proceso son:

- Este proceso adolece de falta de rigor en el planteamiento: se presupone la extensión de la zona central, y de las laterales, precisamente para delimitar la longitud de las mismas.
- Se supone que el crecimiento de las deformaciones es lineal en la zona de transmisión.
- Aún tratándose de vigas que experimentan contraflechas tras la transferencia, se adopta la hipótesis de deformación constante en la zona central: no se tiene en cuenta la deformación por efecto del peso propio.
- No se tiene en cuenta la precisión de la medida de las deformaciones.

El procedimiento de estimación aquí planteado ha sido para los prismas y vigas fabricados:

- Determinación experimental, a una cierta edad tras la transferencia, de los valores de la deformación del hormigón en el paramento  $(x_i, \varepsilon_c(x_i))$ ,  $i = 1, 2, \dots, n_t$ .

- Establecimiento de una solución inicial arbitraria, definida por  $(x_i, \mathcal{E}_c(x_i))$ ,  $i = 1, 2, \dots, n_i$ .
- Ajuste de un perfil trilineal o compuesto de curvas exponenciales generales laterales, y recta horizontal central. En ambos casos el tramo lineal central es horizontal, como corresponde a la hipótesis de deformación constante en esta zona. La ordenada en el origen de las curvas laterales es un parámetro de ajuste, puesto que tiene en cuenta la deformación diferida del hormigón debido a la retracción en la viga.
- El objetivo es minimizar el error cuadrático medio:

$$F = \min \left( \sum_{i=1}^{n_i} (\mathcal{E}_c(x_i) - \varepsilon_c(x_i))^2 \right)$$

donde:

- $n_i$       número total de puntos donde se mide la deformación  
 $\varepsilon_c(x_i)$     valor de la medida experimental de la deformación en el punto  $i = 1, 2 \dots n_f$   
 $x_i$       punto medio de la zona donde se mide la deformación  
 $\mathcal{E}_c(x_i)$     valor de la estimación de la deformación en el punto  $i$

- Las variables son los parámetros que definen las curvas correspondientes a la zona central y los extremos.
- De esta forma, se obtiene una solución a este problema, definida por los valores de los parámetros de las curvas y el valor de  $R^2$  global a lo largo de todo el elemento.
- La bondad del ajuste realizado mediante las curvas planteadas en los extremos se evalúa mediante los valores de  $R^2$  de cada extremo, y de la zona central por separado.
- Definidas las tres curvas, se obtiene la intersección entre cada curva lateral y el tramo central horizontal, intersecciones que definen la longitud de transmisión de cada extremo.

Los defectos que presenta este método son:

- La solución obtenida es una solución que cumple la restricción anterior, pero no tiene por qué ser única, y no se asegura que sea la óptima.
- La criba de datos no concordantes se ha efectuado de forma manual. El siguiente paso, en el que se está trabajando, es en la automatización de la criba, aplicando criterios estadísticos, basándonos en la precisión de la medida de la deformación manual.
- No se tiene en cuenta el efecto Saint-Venant ("shear lag"). En función de la forma de la sección y la distribución del pretensado dentro de la misma (recubrimiento y separación entre cordones), la ley de la deformación del hormigón en contacto con el pretensado y la ley de la deformación del hormigón en el paramento difieren más o menos (FUJI72, véase Capítulo 2). Por ello, aunque la ley de deformaciones en el hormigón en contacto con el pretensado fuese bilineal, en el paramento se apreciaría un perfil distinto, la curva obtenida presentaría un máximo "trasladado" y



“suavizado” respecto al quiebro de la ley de deformación del hormigón en contacto con el pretensado (FHWA94).

- Las deformaciones medidas con el extensómetro son valores medios en una longitud que depende de la longitud base del extensómetro. Por lo tanto, la curva de deformaciones obtenida está “suavizada” respecto a la real (FHWA94).
- La precisión de la aplicación de este método a las medidas en vigas en esta investigación es reducida debido a que:
  - Las medidas tomadas en la zona de transmisión son escasas, comparativamente a las medidas de la zona central.
  - En elementos sometidos a peso propio aparecen deformaciones inducidas por el mismo, que se superponen a la deformación causada por el pretensado.
  - En la zona central de la viga la ley de deformación del hormigón deja de ser constante, y adopta un perfil parabólico. La deformación instantánea en la zona central se puede calcular fácilmente, siempre que estemos fuera de la longitud de desarrollo, pero la deformación diferida producida por el peso propio a una edad genérica es desconocida.
  - En la parte de la longitud de transmisión que pertenece a la longitud de desarrollo, las tensiones no son lineales dentro de la sección, por lo que las deformaciones de peso propio introducen un “ruido” en la deformación total difícil de cuantificar. La estimación de este ruido se podría realizar con un modelo de elementos finitos.

Actualmente se está trabajando en el perfeccionamiento de este método, a fin de obtener un método objetivo de estimación de la longitud de transmisión en prismas pretensados de pretensado centrado.

#### 11.4.2. EVOLUCIÓN DE LA LONGITUD DE TRANSMISIÓN CON EL TIEMPO (MÉTODO LINEAL)

En este apartado se estudia la evolución de la longitud de transmisión con el tiempo, referida a la longitud de transmisión del hormigón convencional.

Por ello, la Tabla 11.4.2-2 y las Gráficas 11.4.2-1 a 11.4.2-4 vienen en función del valor relativo de la longitud de transmisión media entre las caras Este y Oeste, respecto a la longitud de transmisión media del extremo Activo de los prismas de HC, a la edad de transferencia. La nomenclatura empleada se explica en la Tabla 11.4.2-1:

$$VR(L_{bpt,EL,MAT,EXT}(t)) = \frac{L_{bpt,EL,MAT,EXT}(t)}{\text{promedio}(L_{bpt,PR,HC,EXT}(j))}$$

Se observa en la Tabla 11.4.2-2 que en algunos casos, a medida que aumenta la edad de transferencia se produce una disminución del valor de  $VR(L_{bpt,EL,MAT,EXT}(t))$ . Esto puede ser debido, en el caso de las vigas, al escaso número de medidas experimentales en la zona de transmisión, lo que limita la precisión de los métodos de ajuste.

Tabla 11.4.2-1

<i>EL</i>	Elemento
<i>VI</i>	Viga
<i>PR</i>	Prisma
<i>MAT</i>	Material
<i>HC</i>	Hormigón convencional
<i>A.A.</i>	Extremo más próximo al anclaje activo
<i>A.P.</i>	Extremo más próximo al anclaje pasivo
<i>EXT</i>	Extremo
<i>j</i>	Edad de transferencia
<i>t</i>	Edad genérica tras la transferencia
<i>PR</i>	Prisma
$L_{bpt,EL,MAT,EXT}(t)$	Longitud de transmisión, medida en un elemento de un determinado material, en un extremo determinado, transcurrido un cierto tiempo <i>t</i> desde la transferencia, método lineal
$\text{promedio}(L_{bpt,PR,HC,EXT}(j))$	Valor promedio de la longitud de transmisión en las caras Este y Oeste, a la edad de transferencia, de los prismas de hormigón convencional, método lineal
$VR(L_{bpt,EL,MAT,EXT}(t))$	Valor relativo de la longitud de transmisión media entre ambas caras de un material a la edad <i>t</i> , en un determinado extremo, tomando como referencia al hormigón convencional, método lineal

Tabla 11.4.2-2: Evolución del  $VR(L_{bpt,EL,MAT,EXT}(t))$  (método lineal) con el tiempo transcurrido desde la transferencia

		$VR(L_{bpt,EL,MAT,EXT}(j))$	$VR(L_{bpt,EL,MAT,EXT}(t))$	$VR(L_{bpt,EL,MAT,EXT}(t))$	$VR(L_{bpt,EL,MAT,EXT}(t))$	$VR(L_{bpt,EL,MAT,EXT}(t))$
Prisma/viga	Extremo	Transf.	1 semana	1 mes	6 meses	1 año
P1L101	A.A.	1.05	1.06	1.09	1.15	1.10
P1L101	A.P.	0.96	0.98	2.52	2.82	2.86
P2L101	A.A.	1.05	1.03	1.00	1.99	2.01
P2L101	A.P.	1.22	1.22	1.18	1.20	1.19
P3L101	A.A.	1.11	1.09	1.09	1.08	1.04
P3L101	A.P.	1.05	1.06	1.05	1.06	1.03
P1L31	A.A.	0.96	0.93	0.90	2.09	2.19
P1L31	A.P.	1.04	0.98	0.98	0.99	0.99
P2L31	A.A.	1.08	1.14	2.00	2.38	2.32
P2L31	A.P.	1.13	1.23	1.35	1.86	1.85
P3L31	A.A.	0.94	0.96	1.70	1.85	1.85
P3L31	A.P.	0.96	0.91	1.90	1.96	1.97
P3C	A.A.	0.94	0.93	0.96	0.97	0.98
P3C	A.P.	0.87	0.93	0.95	0.92	0.94
P4C	A.A.	1.06	1.08	1.04	1.03	1.01
P4C	A.P.	1.13	1.17	1.19	1.25	1.22
V1L10-1	A.A.	1.17	0.76	1.13	0.85	
V1L10-1	A.P.	1.15	0.90	1.13	1.25	
V2L10-1	A.A.	0.96	1.02	1.06	1.12	
V2L10-1	A.P.	0.82	0.80	0.83	1.15	
V3L10-1	A.A.	0.64	0.79	0.80	0.82	
V3L10-1	A.P.	0.62	1.11	1.21	0.88	
V4L10-1	A.A.	0.71	0.90	0.92	0.94	
V4L10-1	A.P.	1.03	1.06	1.03	1.10	
V5L10-1	A.A.	0.85	0.85	0.89	0.77	
V5L10-1	A.P.	1.20	1.20	1.20	1.20	
V7L10-1	A.A.	1.41	1.50	1.81	1.55	
V2L10-2	A.A.	0.70	0.68	1.18		
V2L10-2	A.P.	1.19	0.56	0.58		
V5C	A.A.	0.62	0.64	0.71		
V5C	A.P.	1.07	0.56	0.61		
V5C	A.A.	1.76	1.32	1.48		



Por otra parte, esto también sucede en los prismas, lo que puede ser debido a la dispersión de las medidas entre la cara Este y la cara Oeste, o debido a la limitación del método lineal.

En las Gráficas 11.4.2-1 y 11.4.2-2 se representa la evolución del valor relativo de las longitudes de transmisión de los extremos activo y pasivo de los prismas, respecto al tiempo transcurrido desde la transferencia. En estas gráficas se aprecia que entre los 20 y 30 días posteriores a la transferencia se produce un aumento acusado de la longitud de transmisión de los prismas de hormigón ligero. Estas fechas coinciden sensiblemente con las fechas de detección de fisuración por hendimiento, constatándose que la fisuración es diferida, es decir, se manifiesta al cabo de un tiempo de la transferencia.

Al año de la transferencia las longitudes de transmisión de los prismas alcanzan valores superiores en un 75%-150% (extremo activo), y en un 75%-200% (extremo pasivo), a los correspondientes al hormigón convencional a la edad de transferencia. Estos valores de longitud de transmisión elevados implican la mayor parte de las veces se ha disipado fuerza de pretensado a lo largo de todo el elemento, por lo que ya no cabe hablar de longitud de transmisión de la fuerza de pretensado  $P(t)$ .

El aumento de longitud de transmisión de los prismas de hormigón convencional fue de un 8% como máximo, durante el año siguiente a la transferencia. El aumento de la longitud de transmisión (método lineal) del extremo activo de la viga V5C fue del 14.5% en los primeros tres meses (Gráficas 11.4.2-1 y 11.4.2-2).

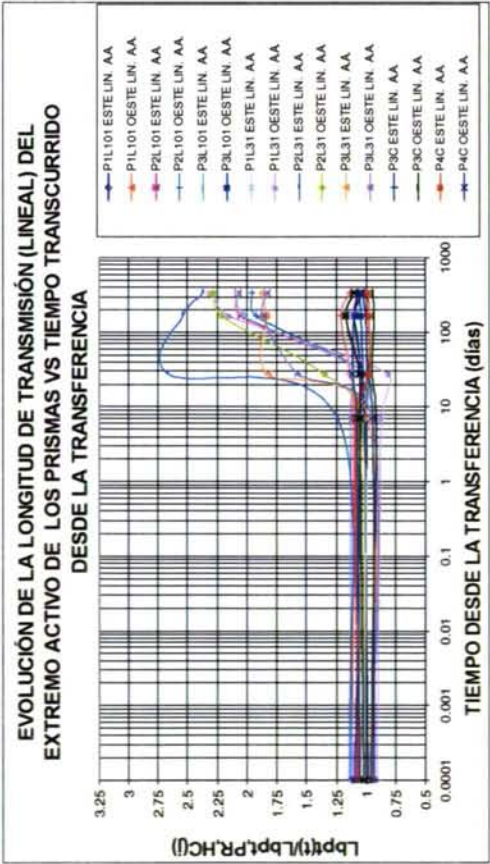
Si se realiza el mismo análisis con las vigas, se observa en la Gráfica 11.4.2-3 una mayor estabilidad de la medida de la longitud de transmisión con el tiempo. Creemos que esto es debido a la presencia de armadura de confinamiento: a pesar de que la armadura de confinamiento no impide la fisuración longitudinal, limita la pérdida de la fuerza de pretensado generalizada a toda la longitud de la viga.

Además se observa en las Gráficas 11.4.2-3 y 11.4.2-4 que, excepto en las vigas V1L10-1 y V7L10-1, las longitudes de transmisión a la edad de transferencia no superan el valor correspondiente a los prismas de HC (que no poseían armadura de confinamiento). Es decir, la presencia de armadura de confinamiento conduce a una disminución apreciable del valor de la longitud de transmisión, entre un 5% y un 40%. Las vigas que presentan el máximo valor relativo de la longitud de transmisión (Gráfica 11.4.2-4) presentan las siguientes particularidades:

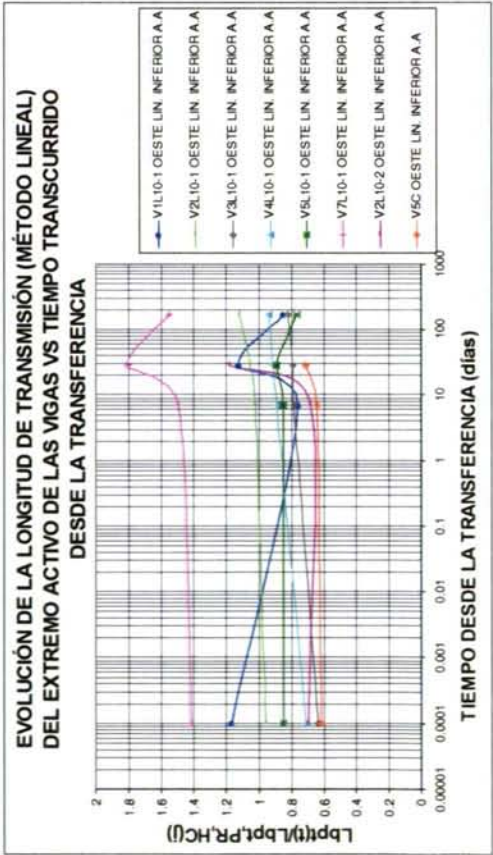
- V1L10-1: viga con armadura de confinamiento mínima, la más alejada, junto con la viga V12L10-1, de la zona de corte. La viga experimenta un choque durante la transferencia, porque no existe nada entre ésta y el extremo de la bancada que amortigüe el choque (se produce un “efecto látigo”, por analogía de las vigas durante la transferencia súbita con un tren). Por esto la longitud de transmisión es más elevada.
- V7L10-1: viga con cuantía máxima de armadura de confinamiento, pero contigua a la zona de corte, por lo que el efecto dinámico es elevado. Por esto la longitud de transmisión es más elevada.

En la Gráfica 11.4.2-4 se observa que los valores máximos de longitud de transmisión a los seis meses de todas las vigas no superan en más de un 25% a la longitud de transmisión media del extremo pasivo de los prismas de HC, hecho achacable a la presencia de la armadura de confinamiento.

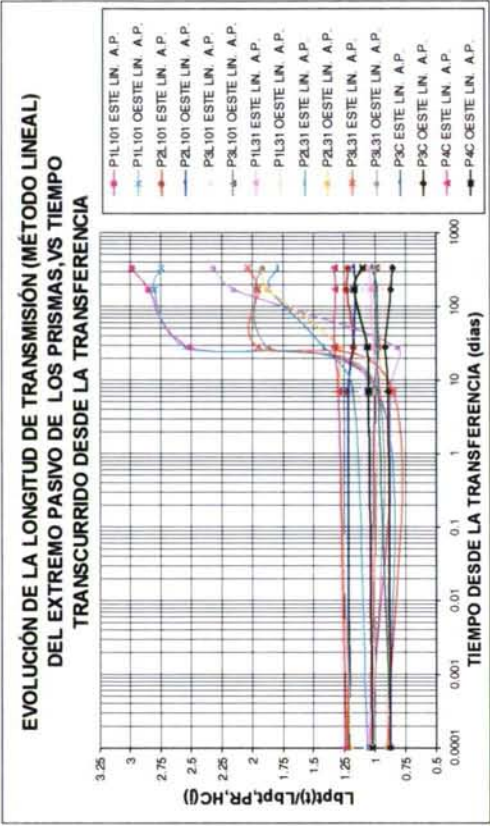




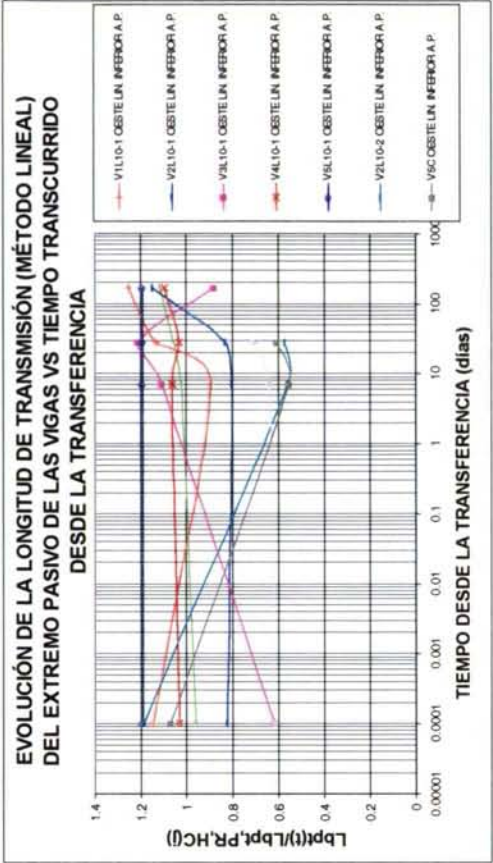
Gráfica 11.4.2-1



Gráfica 11.4.2-3



Gráfica 11.4.2-2



Gráfica 11.4.2-4



## 11.5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS EN LA ZONA DE TRANSMISIÓN

En este apartado se analizan los resultados obtenidos sobre la zona de transmisión, a fin de valorar:

- La correlación entre los valores de penetración del pretensado y la longitud de transmisión en los prismas y las vigas fabricados.
- La influencia de la cuantía de la armadura de confinamiento en la longitud de transmisión
- La correlación entre las predicciones de longitud de transmisión del método anteriormente descrito, basado en los resultados de los ensayos de pórtico, y los valores de la longitud de transmisión obtenidos experimentalmente.
- La correlación entre las predicciones de varias normativas/formulaciones descritas en el Capítulo 2, y los valores de la longitud de transmisión obtenidos experimentalmente.
- La influencia que presenta el tipo de material ensayado.
- La bondad del ajuste mediante el método de determinación de la longitud de transmisión lineal y exponencial, a partir de las deformaciones en el paramento de los prismas y las vigas.

En los siguientes apartados se abordan estas cuestiones.

### 11.5.1. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS PRISMAS Y VIGAS

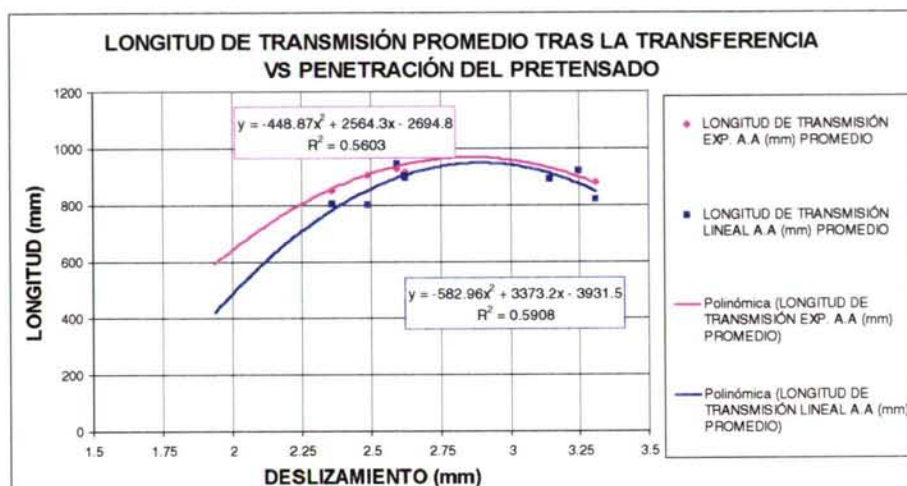
En las Gráficas 11.5.1-1 y 11.5.1-2 se aprecia la relación entre los valores medidos de penetración del pretensado de los prismas y vigas, y la estimación de las longitudes de transmisión inmediatamente tras la transferencia. En la Gráfica 11.5.1-1 se presentan los resultados correspondientes a los extremos activos, en los que no se observa una tendencia clara.

En la Gráfica 11.5.1-2 se presentan los resultados correspondientes al extremo pasivo. En esta gráfica se adivina una cierta tendencia hacia valores de penetración superiores cuanto mayor es la longitud de transmisión, como era de esperar. De todas formas el coeficiente  $R^2$ , indicador de la bondad del ajuste, es bajo. La gran dispersión de medidas de la penetración se ha percibido en las medidas electrónicas y se ha constatado en las medidas manuales efectuadas con calibre durante la segunda serie de vigas.

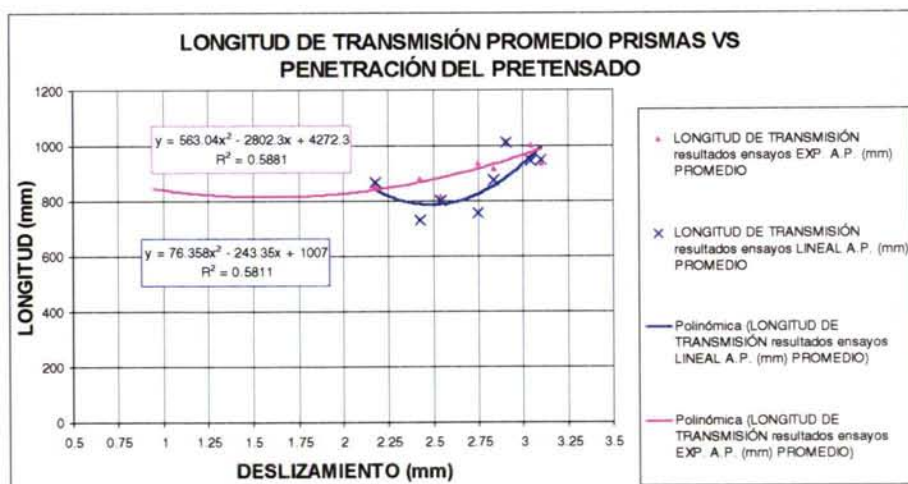
En la Gráfica 11.5.1-3 se aprecia cómo, a mayor cuantía de armadura de confinamiento (desde valor nulo para los prismas de pretensado centrado), menor es el valor de la longitud de transmisión estimada con el método lineal. El coeficiente  $R^2$ , muy reducido en el caso del A.A., es más elevado en el caso del A.P., debido a que estos extremos acusan menos los efectos dinámicos, por lo que el daño ocasionado es menor.

Si observamos la Gráfica 11.5.1-4 se aprecia que cuanto mayor es la cuantía de armadura de confinamiento, menor es la penetración del pretensado en los extremos activo y pasivo de los prismas y vigas. Al igual que en la gráfica anterior, esta tendencia es más acusada en el A.P.

En la Gráfica 11.5.1-5 se aprecia cómo la fuerza de pretensado transferida estimada tras la transferencia es mayor cuanto mayor es el módulo de deformación del hormigón a esa edad, como es lógico. Por otra parte, tal y como se aprecia en la Gráfica 11.5.1-6, aparentemente también influye ligeramente la armadura de confinamiento: cuanto mayor es ésta, mayor es la fuerza de pretensado transferida.

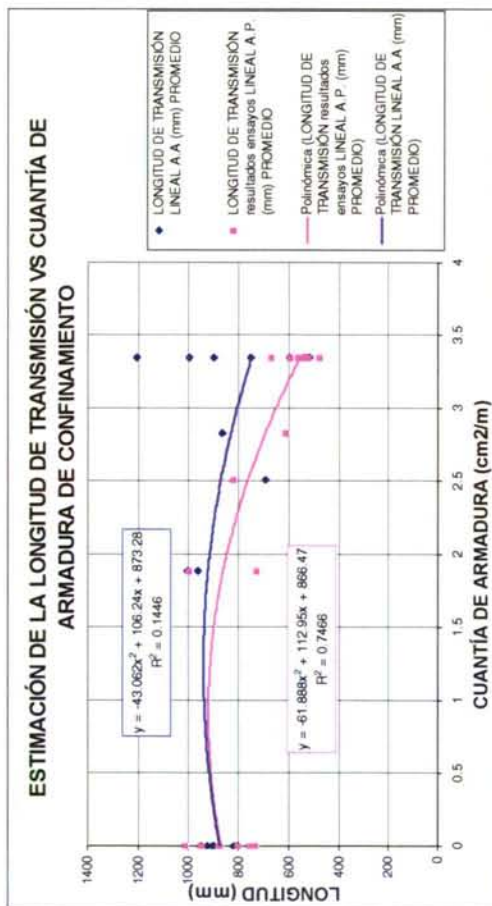


Gráfica 11.5.1-1

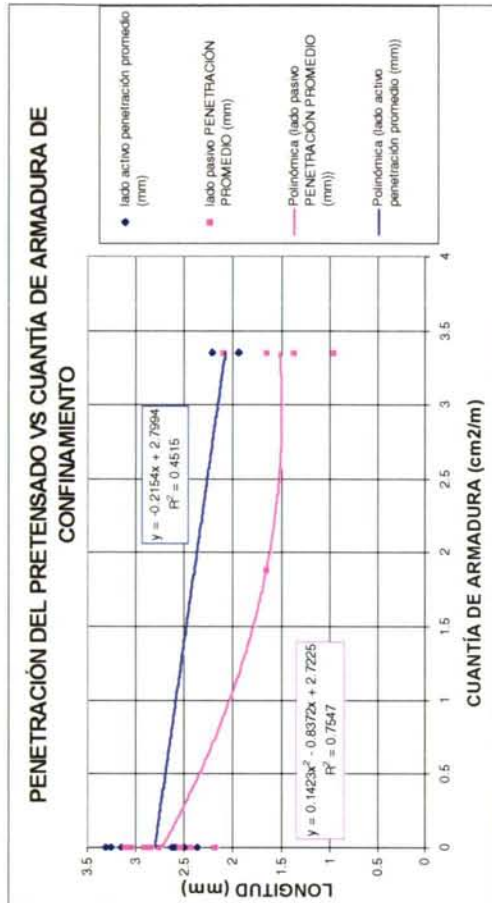


Gráfica 11.5.1-2

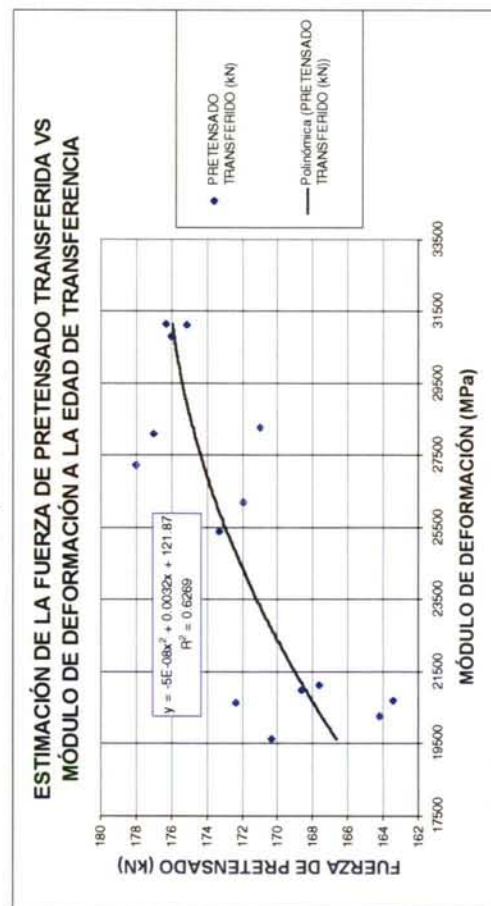




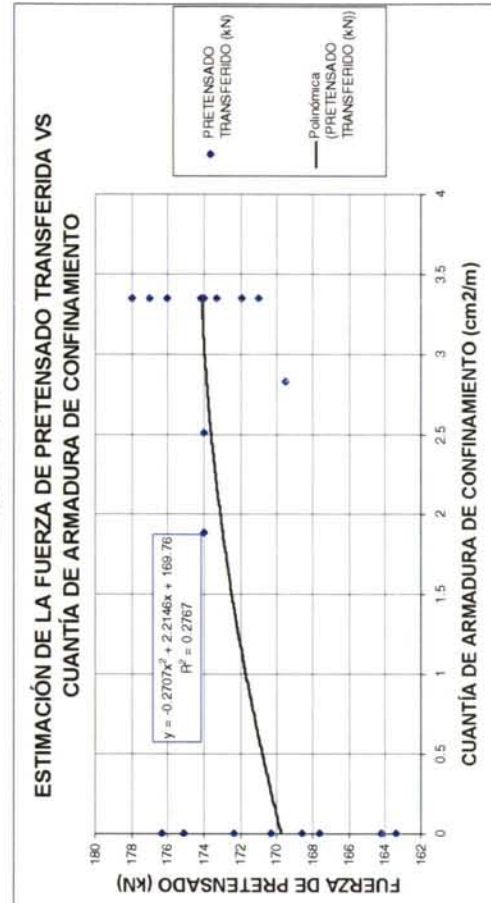
Gráfica 11.5.1-3



Gráfica 11.5.1-4



Gráfica 11.5.1-5



Gráfica 11.5.1-6

### **11.5.2. COMPARACIÓN DE LAS DIFERENTES PREDICCIONES Y LAS LONGITUDES DE TRANSMISIÓN OBTENIDAS EN TODOS LOS HORMIGONES**

En este apartado se realiza una comparación entre las predicciones de las diferentes formulaciones, obtenidas a partir de los resultados experimentales de los ensayos de pórtico, y los datos proporcionados por la instrumentación extensométrica acerca del nivel tensional del pretensado antes y tras la transferencia.

Se analizan los siguientes resultados:

- Valores de las longitudes de transmisión obtenidas en los ensayos de vigas y prismas.
- Predicción de los valores de longitud de transmisión máxima y mínima, para los prismas y las vigas, a partir de los ensayos de pórtico realizados.
- Predicciones de la longitud de transmisión máxima y mínima de las diferentes normativas (CM-90, Eurocódigo, ACI, y diversas formulaciones descritas en el Capítulo 2): a pesar de que ninguna de las formulaciones contempla la aplicación al hormigón ligero, se comparan los resultados experimentales obtenidos para este material con las predicciones.

En la Gráfica 11.5.2-1 se aprecian las predicciones proporcionadas por el método del pórtico. Se aprecia que todos los resultados experimentales correspondientes al A.P. están comprendidos dentro de los límites superior e inferior establecidos. Esto parece lógico, dado que los ensayos de pórtico se realizan de forma gradual, y la transferencia en el A.P. es más gradual que en el anclaje activo. Por otra parte, la mayor parte de los resultados del A.A. están incluidos entre los límites establecidos, si bien no todos, a pesar de los coeficientes correctores introducidos. Las parábolas interpoladas, correspondientes a las cotas superiores e inferiores presentan valores menores para los hormigones ligeros más densos que para el hormigón convencional. Esto significa que la capacidad adherente de los hormigones ligeros es superior, por lo que las tensiones de tracción originadas en la zona de transmisión serán superiores en este tipo de hormigón.

En la Gráfica 11.5.2-2 se aprecian los valores estimados por la formulación del Código Modelo (CM90), respecto a los valores reales de los prismas y vigas, y los predichos por el método de los pórticos. Como se puede observar, los límites del CM-90 comprenden casi todos los valores obtenidos experimentalmente. Además, existe una tendencia paralela entre los resultados experimentales y los límites del CM-90: cuanto mayor es la densidad, menor es la longitud de transmisión a la edad de transferencia. Este ajuste puede parecer casual, teniendo en cuenta que la formulación del CM-90 no contempla la densidad del hormigón en su formulación. La causa estriba en que la formulación del CM-90 tiene en cuenta la resistencia a tracción del material, que presenta, como se ve en la Gráfica 11.5.2-5, una correlación muy ajustada con la densidad. Los valores proporcionados por la formulación del código modelo presentan un grado de ajuste y una tendencia óptimos.

En la Gráfica 11.5.2-3 se aprecian las predicciones del Eurocódigo. La formulación del Eurocódigo establece una relación entre la longitud de transmisión y la resistencia a compresión del hormigón convencional. En este caso, los resultados experimentales no están acotados por las predicciones del Eurocódigo, por lo que estimamos que esta



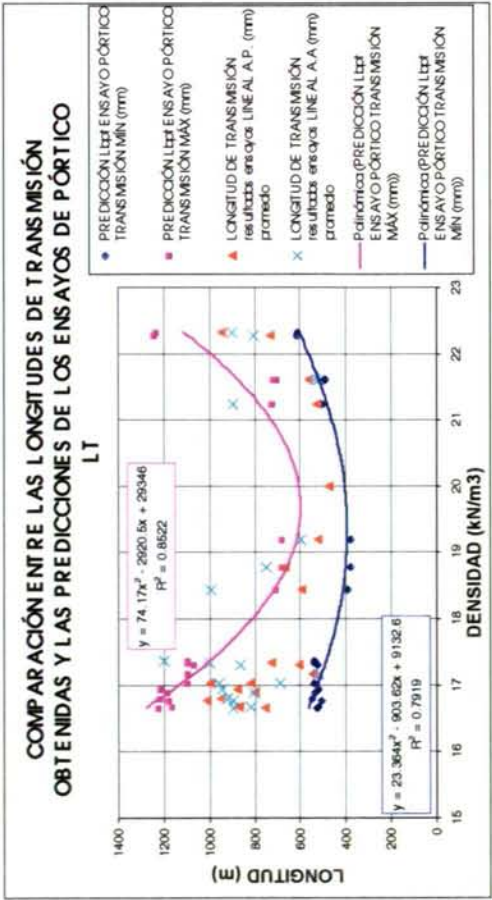
formulación no resulta adecuada. Se aprecia una tendencia similar al caso anterior, la longitud de transmisión disminuye con la densidad. Esto se debe a la correlación entre la resistencia a compresión y la densidad de los hormigones ligeros, que se puede apreciar en la Gráfica 11.5.2-6.

Como se puede observar en la Gráfica 11.5.2-4, las formulaciones planteadas por Russell y Rose proporcionan valores de longitud de transmisión superiores a los obtenidos en la experimentación llevada a cabo. Por otra parte, en esa misma gráfica se aprecia que los valores proporcionados por Zia y Moustafa proporcionan cotas inferiores a los valores obtenidos, similares a los proporcionados por el método del pórtico.

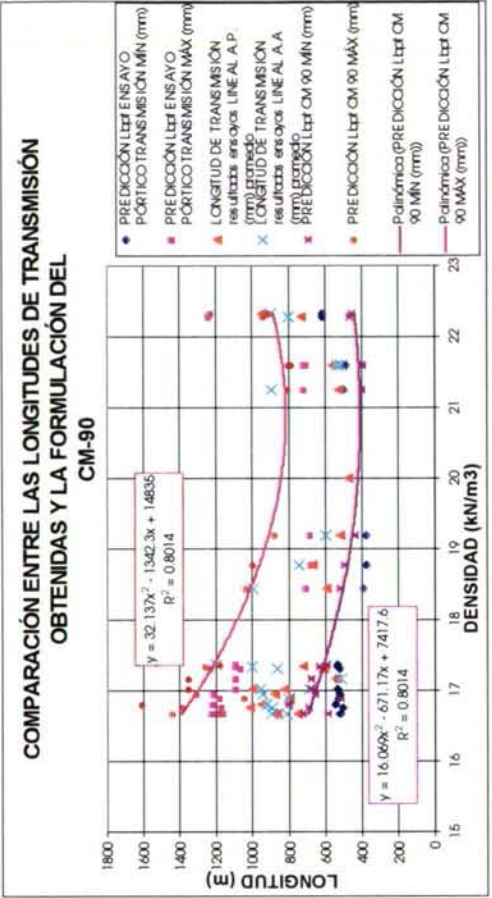
En la Gráfica 11.5.2-7 se aprecia la relación entre la resistencia a tracción y el módulo de deformación a la edad de transferencia. Se aprecia una tendencia clara de crecimiento de la resistencia a tracción con el módulo.

Por su parte, Abrishami y Mitchell no realizaron predicciones de la longitud de transmisión a partir de los resultados de los ensayos realizados (ABRI93).

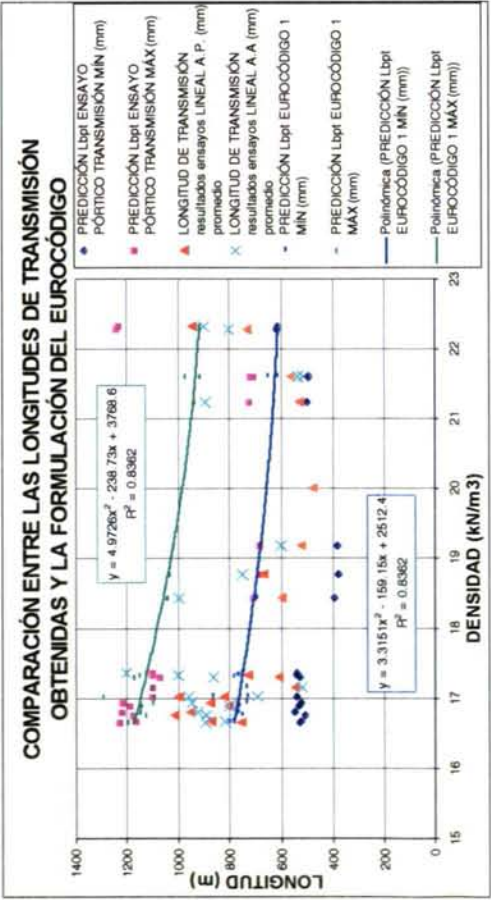
La similitud apreciable entre las predicciones del método de los pórticos, y las del Código Modelo se basa en que ambos métodos se basan en ensayos “push-in” sobre probetas, realizados con cordones con tensión previa (DENU91).



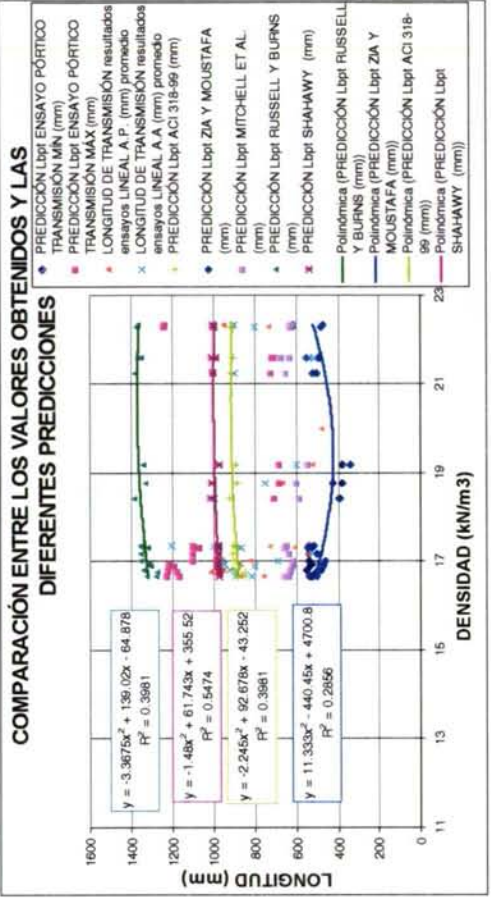
Gráfica 11.5.2-1



Gráfica 11.5.2-2

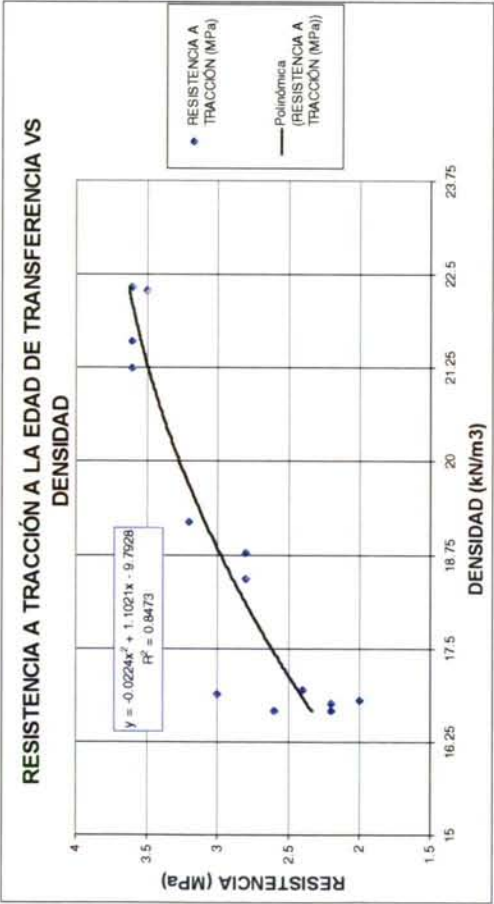


Gráfica 11.5.2-3

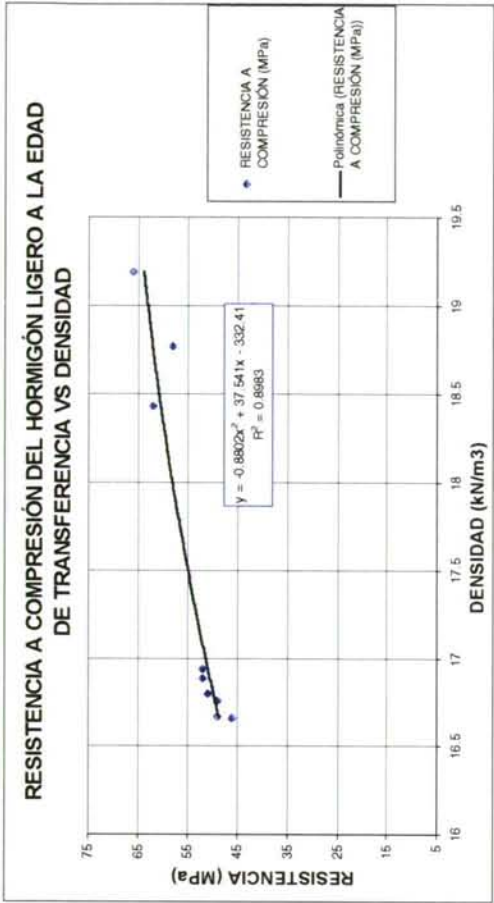


Gráfica 11.5.2-4

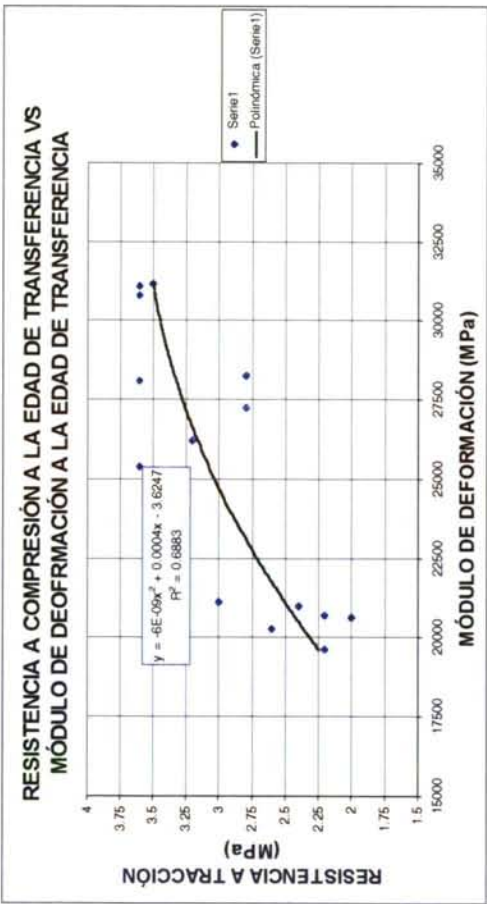




Gráfica 11.5.2-5



Gráfica 11.5.2-6



Gráfica 11.5.2-7

### 11.5.3. COMPARACIÓN DE LAS DIFERENTES PREDICCIONES Y LAS LONGITUDES DE TRANSMISIÓN OBTENIDAS EN LOS HORMIGONES LIGEROS

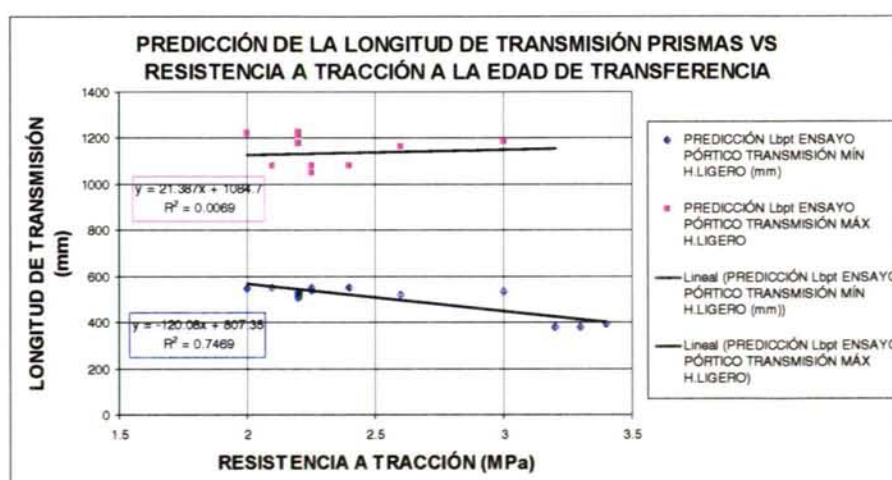
En este apartado se presentan las predicciones de los ensayos de pórtico, y de las diferentes formulaciones, correspondientes a los resultados de hormigón ligero, en las que se han introducido los datos experimentales disponibles. El objetivo es evaluar la posibilidad de extrapolar las formulaciones deducidas para hormigones convencionales a todos los hormigones ligeros estudiados.

En el eje de abscisas se representará a continuación la densidad de los elementos considerados, lo que permite distinguir los diferentes tipos de hormigón ligero (densidad menor que  $21 \text{ kN/m}^3$ ).

La relación entre las cotas superior e inferior proporcionadas por el ensayo del pórtico para la longitud de transmisión (dependiente de la F.U.A. máxima) y la resistencia a tracción del hormigón ligero se aprecia cualitativamente en la Gráfica 11.5.3-1. Se observa que la correlación es nula en el caso de la cota superior, y elevada en el caso de la inferior. De esto se deduce que la F.U.A. máxima presenta un comportamiento fuertemente condicionado por la resistencia a tracción a la edad de ensayo.

Analizando los resultados proporcionados por las diferentes formulaciones, que se reflejan en las Gráficas 11.5.3-2 a 11.5.3-5, se deduce:

- La predicción de las cotas superiores del código modelo proporciona una aproximación segura de los resultados obtenidos. La tendencia es en el sentido de proporcionar resultados menores de longitud de transmisión, cuanto mayor es la densidad. Los resultados proporcionados por el CM-90 se ajustan mejor a los resultados experimentales de los prismas y las vigas que la cota superior proporcionada por los pórticos de ensayo.
- La predicción del ensayo de pórtico, de las cotas inferiores de la longitud de transmisión proporciona una aproximación segura de los resultados obtenidos, mejor que la proporcionada por el CM-90 y otras formulaciones. También proporciona valores muy similares la predicción de Zia y Moustafa, que se basa en la aplicación de análisis de regresión a los resultados experimentales de diversas investigaciones (véase Capítulo 2).



Gráfica 11.5.3-1





#### 11.5.4. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Como conclusiones cabe destacar:

- A partir de los resultados experimentales, no se aprecia una tendencia conjunta para ambos tipos de hormigón, por lo que parece más apropiado realizar un ajuste para cada hormigón convencional y ligero por separado. Analizando los hormigones ligeros por separado se aprecian unas tendencias comunes entre las diferentes dosificaciones. Existe una correlación elevada entre las propiedades adherentes y la resistencia a tracción a la edad de transferencia, y entre las propiedades adherentes y la densidad del hormigón, en el caso de los hormigones ligeros.
- El valor de la longitud de transmisión a la edad de transferencia disminuye a medida que aumenta la densidad del hormigón.
- La predicción más apropiada, a nuestro juicio, para estimar el valor máximo de la longitud de transmisión a la edad de transferencia es la formulación del CM-90.
- El método más apropiado, a nuestro juicio, para estimar el valor mínimo de la longitud de transmisión es el método de acotación de la longitud de transmisión, basado en el ensayo del pórtico.
- De los resultados experimentales se confirma que los hormigones ligeros presentan mejor capacidad adherente. Esta puede ser la causa de que, tras la transferencia, se produzca un gradiente de la fuerza de pretensado a lo largo de la longitud de transmisión. A causa de esto, las tensiones de tracción originadas son superiores en la zona de transmisión, lo que, unido a la resistencia a tracción más baja puede ser la causa de la aparición de fisuración por hendidamiento, y del elevado aumento de la longitud de transmisión con el tiempo en los prismas.

#### 11.6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA ZONA COMPLEMENTARIA A TRACCIÓN

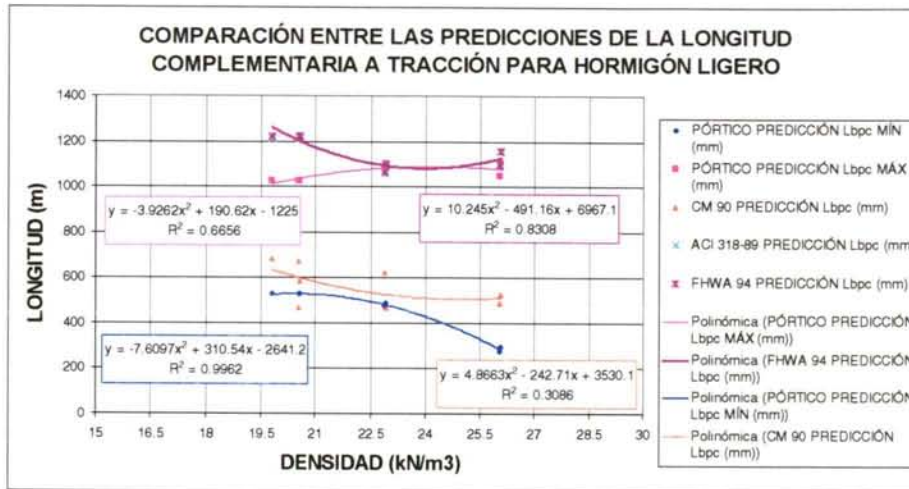
En la Gráfica 11.6-1 se comparan las predicciones proporcionadas, para la longitud complementaria a tracción, por las diferentes formulaciones: ensayo de pórtico, Código Modelo (CM90), normativa ACI 318-99 (ACIC99) y la FHWA (FHWA94).

Estas formulaciones establecen las longitudes complementarias a tracción para hormigones convencionales. En este apartado hemos extrapolado la formulación para el caso de hormigón ligero, para comparar las formulaciones con las predicciones del ensayo de pórtico.

En la Gráfica 11.6-1 se puede apreciar una cierta similitud entre la predicción de la cota superior de la longitud complementaria a tracción y la formulación de la FHWA en el caso del HC (máxima densidad). La tendencia de la formulación de la FHWA parece más coherente con la realidad: a mayor densidad, menor es la longitud complementaria a tracción obtenida. El ajuste polinómico parece indicar un mínimo en  $23 \text{ kN/m}^3$  y, desde luego, la tendencia contraria.

La formulación del Código Modelo proporciona valores similares a los estimados a partir del ensayo de pórtico LC para la cota inferior de la longitud complementaria a tracción (Gráfica 11.6-1). Las cotas inferiores predichas por el ensayo del pórtico presentan una tendencia a disminuir a medida que aumenta la densidad.

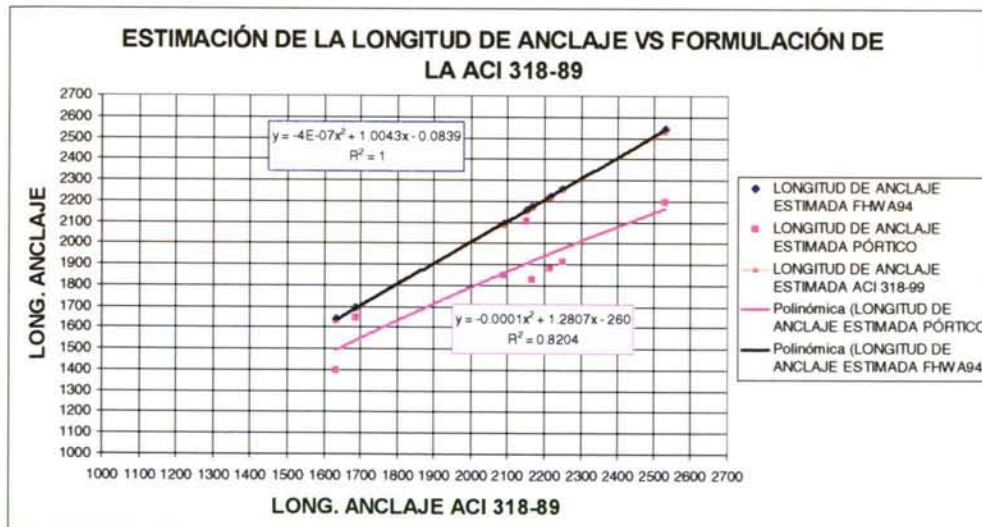




Gráfica 11.6-1

En la Tabla 11.6-1 se observan los valores de la longitud complementaria a tracción estimados por diversas formulaciones, las cuales se han extrapolado a los elementos de hormigón ligero (fuera de su campo de aplicación). También se comparan las predicciones de longitud de anclaje total. Los valores de la longitud de transmisión han sido estimados a partir de las medidas manuales en las vigas de la misma armadura de confinamiento, a la edad de ensayo. Sumando los valores de la longitud de transmisión estimados y los de las longitudes complementarias previstas, se obtienen las previsiones de longitud de anclaje. Se observa una similitud apreciable de las predicciones de longitud complementaria de la ACI y de la FHWA, respecto a la predicción del método del pórtico. En la última columna aparecen las cotas obtenidas experimentalmente de la longitud de anclaje.

En la Gráfica 11.6-2 se presentan los valores de estimación de la longitud de anclaje del método del pórtico y de la formulación propuesta por la FHWA, respecto a la formulación de la ACI 318-89. Se aprecia un buen ajuste de la recta de regresión lineal entre los valores estimados y la citada formulación.



Gráfica 11.6-2

Tabla 11.6-1

Viga	Edad de ensayo	Armadura confinamiento	Longitud de transmisión estimada a partir de la instrumentación, a la edad de ensayo	Longitud complementaria a tracción prevista ACI 318-99	Longitud complementaria a tracción prevista FHWA94	Longitud complementaria a tracción prevista pórtico	Longitud de anclaje estimada ACI 318-99	Longitud de anclaje estimada FHWA94	Longitud de anclaje estimada pórtico	Longitud de anclaje obtenida
	días		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
V6L10-1	56	c 6 a 10	952	1213	1221	875	2165	2173	1827	≤4000
V7L10-1	293	c 8 a 15	1317	1213	1221	875	2530	2538	2192	≤4000
V10L10-1	139	c 6 a 15	1037	1213	1221	875	2250	2258	1912	≤4000
V12L10-1	63	c 8 a 20	1002	1213	1221	875	2215	2223	1877	≤4000
V4C	49	c 8 a 15	598	1089	1095	1045	1687	1693	1643	
V6C	76	c 8 a 15	573	1058	1064	821	1631	1637	1394	<2750
V3L10-2	55	c 8 a 15	1000	1151	1158	1105	2151	2158	2105	
V11L10-2	90	c 8 a 15	1000	1089	1095	845	2089	2095	1845	<3250

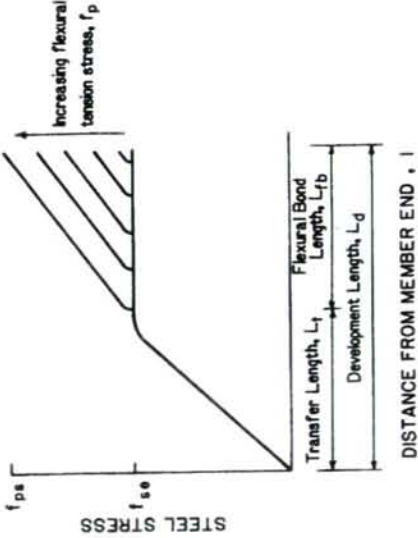


Figura 11.6-1

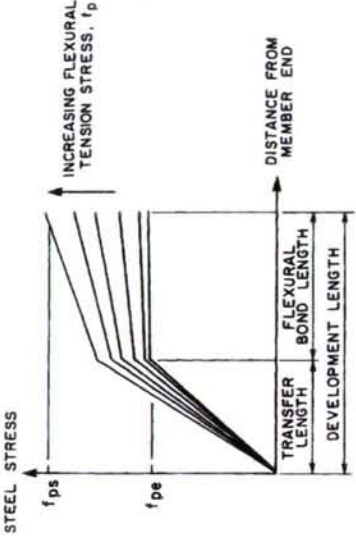


Figura 11.6-2



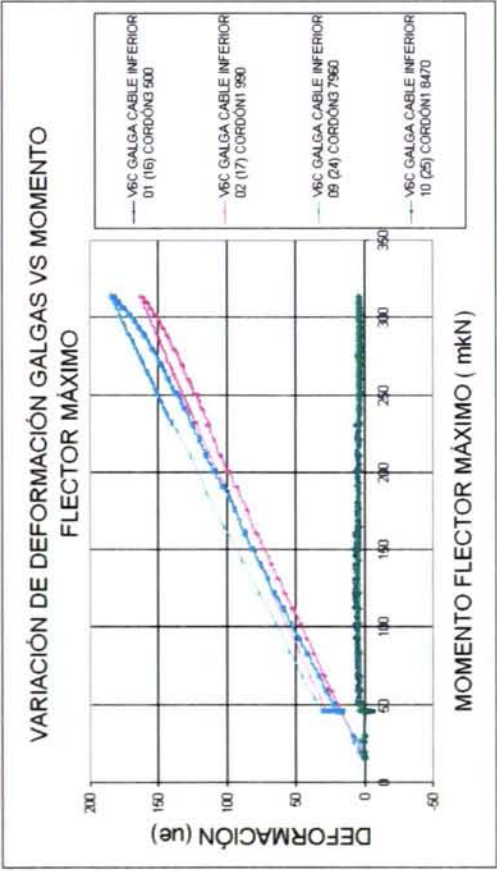
Por lo que respecta a la distribución de las tensiones de pretensado a lo largo de la longitud de anclaje, como se vio en el Capítulo 2, hay dos teorías:

- La primera (Figura 11.6-1), postulada por Hanson y Kaar (HANS59) defiende que el aumento de la tensión del pretensado se produce inicialmente en la zona de máximo flector, afectando sólo a una zona próxima. A medida que aumenta la carga, aumenta la tensión del pretensado, y la zona implicada se extiende hacia la zona de transmisión. Según esta teoría, la tensión en la zona de transmisión no varía. El agotamiento por fallo del anclaje se produce cuando la zona implicada alcanza la longitud de transmisión, momento en que se alcanza la máxima fuerza de pretensado al final de la zona de anclaje. Si las cargas siguen aumentando, el pretensado no es capaz de desarrollar más tensión, por lo que las tensiones internas de la sección no pueden equilibrar los esfuerzos. En este momento el tendón desliza y se produce el colapso.
- La segunda teoría (WEER91, Figura 11.6-2) plantea una distribución de tensiones lineal en ambas zonas: longitud de transmisión y longitud complementaria a tracción. La diferencia con la teoría anterior estriba en que en la zona de transmisión se considera un cierto aumento de tensión del pretensado.

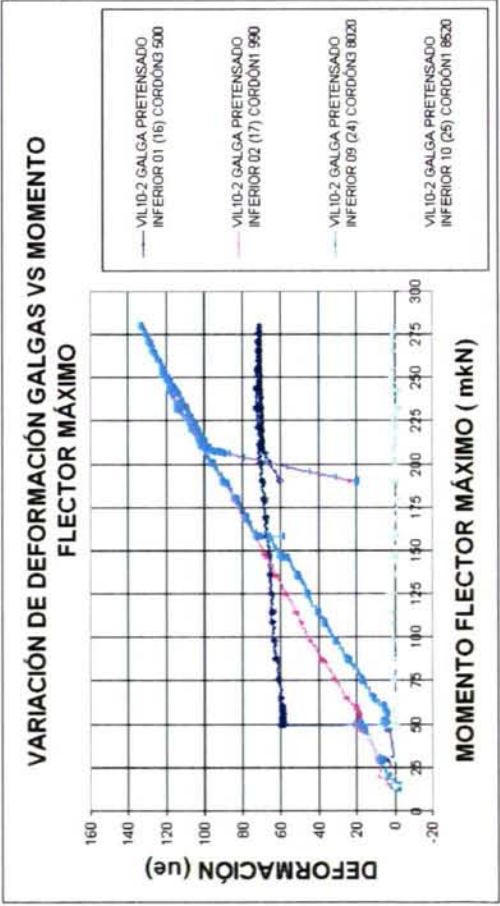
Los resultados obtenidos en la presente investigación concuerdan con la segunda teoría: se aprecian variaciones de deformación del pretensado en ambas zonas: en la longitud de transmisión y en la zona complementaria a tracción, si bien se aprecia que la variación de deformación en la zona de transmisión es reducida (véanse Gráficas 11.6-3 a 11.6-6, correspondientes a dos vigas de HC y de HL10-2 respectivamente). La variación de deformación durante el ensayo a flexión de las vigas (de corta duración) lleva aparejada una variación de tensión. El número de galgas extensométricas situadas en la zona central de flexión constante no es suficiente para establecer la forma del perfil de deformación del pretensado dentro de la zona complementaria a tracción y, por lo tanto, la forma del perfil de tensión.

La variación de deformación del pretensado, y por lo tanto de tensión en la zona de transmisión, creemos que es debida a lo siguiente:

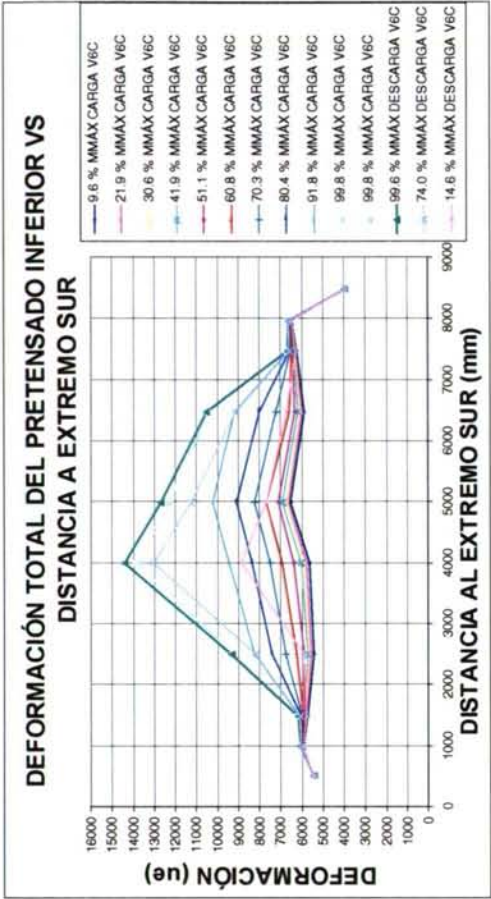
El pretensado tiende a transferirse en la mínima longitud posible (mínima energía). Por ello, la fuerza de pretensado tras pérdidas instantáneas,  $P_3$ , agota la capacidad adherente de la zona de transmisión. A medida que pasa el tiempo se produce una pérdida de pretensado en la zona central de la viga, por lo que la fuerza de pretensado adopta el valor de  $P(t) < P_3$  en esta zona. Al disminuir el gradiente de la fuerza de pretensado en la longitud de transmisión, disminuyen las tensiones de adherencia. De esta forma, a la edad de puesta en carga existe una capacidad adherente remanente en la zona de transmisión. Si no consideramos los efectos de la retracción y la fluencia en la “huella” dejada por el pretensado en el hormigón, la fuerza de pretensado podría recuperar al final de la longitud de transmisión el valor de  $P_3$  antes de agotar la capacidad adherente.



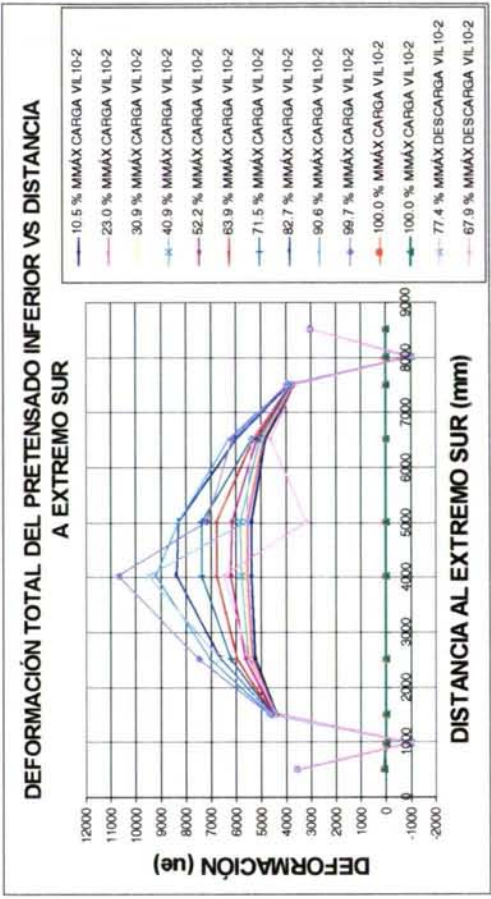
Gráfica 11.6-3



Gráfica 11.6-5



Gráfica 11.6-4



Gráfica 11.6-6



## 11.7. VALORACIÓN CRÍTICA DE LA ACOTACIÓN DE LA LONGITUD DE ANCLAJE A PARTIR DEL ENSAYO DE LOS PÓRTICOS

Este método, semiempírico, se basa en extrapolar los resultados de F.U.A. obtenidos en los ensayos de adherencia en probeta, a los elementos pretensados reales.

En la Tabla 11.7-1 se analizan los factores que tienen en cuenta los ensayos de los pórticos sobre la zona de transmisión y sobre la zona complementaria a tracción, y los que tienen en cuenta otras formulaciones. Como se observa, algunos factores identificados por diversos autores no se tienen en cuenta en ninguno de los planteamientos.

Las principales ventajas de este ensayo son:

- Es sencillo, fácilmente reproducible y, con las debidas precauciones, muy seguro.
- Los resultados proporcionados por estos ensayos permiten acotar superior e inferiormente las longitudes de transmisión y complementaria a tracción. Además, se puede valorar la susceptibilidad de un tipo de hormigón a presentar fisuración en la zona de transmisión y en la zona complementaria a tracción.
- Los pórticos de ensayo son fáciles de instalar, y presentan una elevada versatilidad: permiten la realización de ensayos “pull-out” en armadura pasiva/activa (ABRI93).
- Además, los pórticos diseñados son transformables en una bancada de pretensado de laboratorio para fabricar prismas o vigas.
- Los ensayos en que se basa la formulación del código modelo (CM90) para acotar la longitud de transmisión son ensayos de “push-in” en probeta, con cordón previamente tesado, al igual que los ensayos realizados en esta investigación. De hecho se ha apreciado una gran similitud entre los resultados obtenidos y la formulación del código modelo.
- Los ensayos en que se basa la formulación del código modelo (CM90) para acotar la longitud complementaria son ensayos de “pull-out” realizados sobre probeta, con pretensado sin tensión previa. En nuestro caso, los ensayos de pórtico LC se realizaron sobre cordón con tensión previa, simulando las condiciones reales en la viga. De todas formas, el planteamiento de ambos tipos de ensayo es similar. De hecho se ha apreciado una cierta similitud entre los resultados obtenidos y la formulación del código modelo.

Las principales objeciones que presentan estos ensayos son:

- La situación del cordón respecto a adherencia es favorable, por estar en posición vertical durante el hormigonado, al contrario de lo que sucede en la realidad.
- El estado tensional del hormigón, en el ensayo de simulación de la zona complementaria a tracción, es diferente del que se presenta en la realidad: durante el ensayo se produce una ligera compresión longitudinal del hormigón (Capítulo 6), cuya resultante es igual a la diferencia de la fuerza de pretensado en la parte inferior y superior de la probeta. Sin embargo, en la realidad el hormigón que rodea el cordón en la zona complementaria a tracción está traccionado.
- La longitud adherente es de 30 cm en la probeta. Dentro de la probeta la distribución de tensiones de adherencia no es uniforme (ABRI96), por lo que la F.U.A. obtenida es un valor medio a lo largo de esa longitud, condicionado por la forma de la ley.

- El ensayo no permite simular la posible presencia de fisuración por flexión/cortante en la longitud de anclaje.
- El ensayo no permite simular una transferencia súbita de pretensado.
- El ensayo está concebido para un solo cordón de pretensado centrado, por lo que no permite el estudio de la interacción entre varios cordones de pretensado excéntricos.
- El ensayo no permite ensayar la influencia del enfundado parcial de cordones de pretensado.

El método planteado de acotación de la longitud de anclaje estática es aplicable si la longitud de transmisión es convergente: esto sucede si la fisuración por hendimiento no se ha generalizado a lo largo del elemento, e incluso en este caso, es aplicable si el confinamiento de la armadura pasiva transversal es suficiente para estabilizar la longitud de transmisión. Si la fisuración se ha generalizado, se pueden haber producido pérdidas de pretensado generalizadas a todo el elemento, con lo que puede haberse fragilizado la estructura: cuanto menor es la fuerza de pretensado  $P(t)$  mayor es el valor resultante de la longitud complementaria y, por lo tanto, el valor de la longitud de anclaje total.

Tabla 11.7-1

	Pórtico simulación longitud de transmisión	Pórtico simulación longitud complementaria	Método de estimación planteado	CM-90/ EHE98 (DENU91)	Eur
Diámetro del cordón de pretensado	X	X	X	X	X
Tensión inicial de tesado	X	X	X	X	X
No linealidad zona complementaria a tracción					
Pérdidas de pretensado	X	X	X	X	X
Edad de transferencia	X	X	X	X	X
Tipo de transferencia: gradual o súbita			X	X	X
Edad de ensayo/puesta en carga	X	X	X	X	X
Tipo de pretensado: alambre o cordón	X	X	X	X	X
Rugosidad superficial	X	X	X	X	
Verticalidad del cordón respecto a horizontal			X		
Espesor de hormigón fresco debajo del cordón considerado				X	
Recubrimiento	X	X	X	X	
Separación entre cordones				X	
Consistencia del hormigón durante la colocación	X	X	X		
Compacidad del hormigón alrededor del cordón					
Presencia de armadura de confinamiento	X	X			
Resistencia del hormigón a compresión					X
Resistencia a tracción		X	X	X	X
Rigidez del hormigón	X	X	X		
Tipo de comprobación: fisuración o rotura	X	X	X	X	X
Retracción					
Fluencia					
Efectos diferidos de la adherencia	X	X	X		
Efecto dinámico de las cargas aplicadas					
Enfundado parcial del cordón					X
Cercanía de la viga a la zona de corte					
Longitud de cable libre entre vigas					
Recubrimiento con mortero epoxi	X	X			
Tratamientos térmicos: curado acelerado	X	X			
Tipo de hormigón: ligero o convencional	X	X	X		X





UNIVERSIDAD DE LA CORUÑA  
E.T.S. INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS  
Departamento de Tecnología de la Construcción



**ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES  
DE ADHERENCIA DE CORDONES DE PRETENSADO  
EN ELEMENTOS PREFABRICADOS DE HORMIGONES  
DE ALTAS PRESTACIONES INICIALES**

*Trabajo realizado como requisito para obtener el grado de  
Doctor, por:*

***Cristina Vázquez Herrero***

*Directores:*

***Fernando Martínez Abella  
Manuel Casteleiro Maldonado***

*A Coruña, Diciembre de 2000*

## 11.8. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS COMPARATIVO

- En los prismas de hormigones ligeros fabricados sin armadura de confinamiento el valor de la longitud de transmisión no se estabilizó, sino que en algunos casos fue divergente. Por ello, el hormigón ligero sin armadura de confinamiento, con el recubrimiento adoptado (45 mm) es incapaz de garantizar la transferencia de la fuerza de pretensado  $P(t)$  de forma duradera. El motivo es la aparición de fisuración por hendimiento diferida, fisuración progresiva que se inicia transcurrido un cierto tiempo tras la transferencia (de varios días a varias semanas), y que se propaga gradualmente a lo largo de toda la longitud del prisma.
- En las vigas fabricadas con diferentes cuantías de armadura de confinamiento, la presencia de ésta conduce a valores menores de la longitud de transmisión a la edad de transferencia, con reducciones de hasta un 40% respecto a los valores obtenidos en los prismas de pretensado centrado (sin armadura de confinamiento). La presencia de armadura de confinamiento también conduce a valores menores de penetración del pretensado durante la transferencia.
- La armadura de confinamiento de las vigas contribuye a limitar el aumento de la longitud de transmisión tras la transferencia. La longitud de transmisión de las vigas se estabilizó durante el período de medida. En ninguna viga la longitud de transmisión estática estimada con el método lineal superó los 1550 mm.
- La transferencia súbita en las vigas conduce a valores de longitud de transmisión elevados. Por ello es recomendable la fabricación de bloques de amortiguación contiguos a la zona de corte, y entre ambos extremos de la bancada y las vigas contiguas a estos. Esta práctica se llevó a cabo durante la fabricación de la segunda serie de vigas. Los daños apreciados en los extremos de las vigas fueron considerablemente menores en la segunda serie.
- Los métodos de estimación de la longitud de transmisión planteados: método lineal y exponencial, proporcionan resultados de longitud de transmisión similares y coherentes para los prismas de pretensado. Sin embargo, la precisión es menor en el caso de las vigas, debido a que existen pocos datos en la zona de máxima variación de las deformaciones, precisamente la zona de transmisión.
- El método exponencial presenta un grado de ajuste superior al método lineal para estimar longitudes de transmisión “convergentes” de los prismas de hormigón ligero. Se entiende como longitud de transmisión convergente a la que se obtiene cuando realmente existe transferencia de pretensado dentro del elemento considerado, a la edad de medida (es decir, existe “zona central” de la viga). Sin embargo, en el caso de los prismas de HC no se aprecia el predominio de ninguno de los métodos sobre el otro.
- Del análisis comparativo se propone, como método de estimación de la cota superior de la longitud de transmisión inmediatamente después de la transferencia, la formulación del CM-90, que para los resultados experimentales obtenidos presenta un ajuste óptimo. Los valores proporcionados por el ensayo del pórtico de transmisión son lo suficientemente aproximados, aunque la tendencia que presenta la formulación del CM-90 se ajusta mejor a los datos experimentales obtenidos. Sería recomendable realizar una campaña de ensayos de pórticos de transmisión y prismas con diferentes cuantías de armadura de confinamiento y diferentes



recubrimientos, fabricados con diferentes dosificaciones de hormigón, para corroborar esto.

- Para estimar la cota inferior de la longitud de transmisión se recomienda el método de acotación de la longitud de transmisión propuesto, basado en los resultados experimentales ensayo de pórtico LT. Este método muestra un grado de ajuste aceptable, y una tendencia adecuada a los resultados experimentales.
- Las predicciones de longitud complementaria a tracción del ensayo de pórtico presentan un parecido razonable con las predicciones de la FHWA (FHWA94), concebidas para elementos sin fisuración en la zona de anclaje. Sería necesaria una campaña de ensayos exhaustiva en vigas y pórticos, para poder comparar las predicciones con los resultados experimentales de los diferentes tipos de hormigón.
- A nuestro juicio, la excesiva capacidad adherente del conjunto cordón de pretensado de 15.2 mm y los hormigones ligeros es la responsable de que se generen tensiones de tracción elevadas en la zona de transmisión, que conducen a la aparición de fisuras. A partir de ese instante, la propagación de fisuras se produce de forma incontrolada, debido al insuficiente efecto pasador del árido ligero. Una posible solución sería reducir la adherencia, por ejemplo, a través del empleo de cordones de pretensado compactos. Por otra parte, esto conduciría a valores más elevados de la longitud de transmisión y, en general, de la longitud de anclaje. Creemos que sería necesario experimentar en esta dirección.
- Hay que tener en cuenta que los valores de la F.U.A determinados a partir de los ensayos de pórtico, han sido obtenidos en probeta cilíndrica, con longitud adherente de 300 mm (la altura de la probeta). La distribución de tensiones de adherencia dentro de la probeta y, por lo tanto, su valor medio, depende de la distancia en que exista adherencia. Por lo mismo, la definición del deslizamiento generalizado vendrá condicionada por esta longitud.
- Se han detectado aumentos de deformación del pretensado en la zona de transmisión durante el ensayo a flexión de las vigas. El aumento de deformación en esta zona es marcadamente lineal con el momento actuante. Esto contradice el modelo propuesto por Hanson y Kaar (HANS59), que establece que durante la carga de la viga, mientras el pretensado esté correctamente anclado sólo se produce aumento de tensión del pretensado en la zona complementaria a tracción.
- La menor ductilidad de las vigas de hormigón ligero se debe a la elevada linealidad del diagrama tensión-deformación, a la menor área bajo la rama plástica del diagrama tensión-deformación a compresión, a los valores reducidos de deformación del hormigón en rotura a compresión y a la menor resistencia a tracción de este material (E21496). Además, las pérdidas de pretensado son más elevadas para este material. Por ello, para que una sección transversal de hormigón ligero pretensado presente la misma ductilidad que una de hormigón convencional, para una misma fuerza de pretensado inferior se hace necesario aumentar el canto, lo que va en contra de la reducción de peso propio, que constituye la ventaja del empleo del hormigón ligero.





## *Capítulo 12*

### **CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS DE FUTUROS TRABAJOS**

Del estudio de las investigaciones previas, y de las experimentales y analíticas descritas en este trabajo, se pueden extraer las siguientes conclusiones y recomendaciones:

#### **12.1. CONCLUSIONES RELATIVAS A LAS PROPIEDADES BÁSICAS DE LOS HORMIGONES ENSAYADOS**

- 1.1. Se ha trabajado con tres tipos de hormigón de altas prestaciones: un hormigón convencional de referencia y dos tipos de hormigón ligero con árido grueso (arcilla expandida) y arena de machaqueo de diferentes densidades. La reducción en peso respecto al hormigón convencional ha variado entre un 16% y un 23%, obteniéndose densidades entre  $22.2 \text{ kN/m}^3$  y  $16.7 \text{ kN/m}^3$  respectivamente.
- 1.2. Las deformaciones de retracción de los hormigones ligeros son superiores a las que presenta el hormigón de referencia: durante el primer año se observan deformaciones entre un 10% y un 30% superiores, dependiendo del tipo de hormigón ligero. Este fenómeno conlleva un aumento de las pérdidas de pretensado. Por otra parte, durante las primeras edades se ha constatado la existencia de un entumecimiento elevado en los hormigones ligeros, de entre 150 y 175  $\mu\epsilon$  a las 24 horas del hormigonado.
- 1.3. Las dosificaciones de hormigón ligero HL3-1/HL10-1 presentan una resistencia a compresión a la edad de dos días (edad de transferencia de las vigas de este material) un 2-6% inferior al HC, una resistencia a tracción directa instantánea un 20% inferior a la del HC, y un módulo de deformación secante un 34% inferior al del HC. La capacidad de deformación plástica de los hormigones ligeros en rotura es menor que la del HC.
- 1.4. El HL10-2 presentan una resistencia a compresión a la edad de tres días (edad de transferencia de las vigas de este material, y de realización de los ensayos LT y LC), un 20% superior a la del HC, una resistencia a tracción directa instantánea igual al valor medio del HC, y un módulo de deformación secante un 18% inferior al del HC. La capacidad de deformación plástica del HL10-2 en rotura es menor que la del HC.

## 12.2. CONCLUSIONES RELATIVAS AL ENSAYO DE LOS PÓRTICOS

- 2.1. Se han establecido las bases de dos ensayos de laboratorio, inspirados en los ensayos de Abrishami-Mitchell (ABRI93) que posibilitan la simulación en una probeta de la zona de transmisión (ensayo de pórtico LT) y de la zona complementaria a tracción (ensayo de pórtico LC) de un cordón de pretensado. El cordón de pretensado previamente tesado presenta unas condiciones de adherencia favorables (hormigonado con cordón vertical) en los 300 mm de altura de la probeta.
- 2.2. Los ensayos planteados permiten el estudio comparativo de las propiedades adherentes de las zonas de transmisión y complementaria a tracción, pudiéndose analizar los diferentes factores que influyen en la adherencia: tipo de hormigón, tipo de armadura, tensión de tesado, recubrimiento, forma de la probeta, longitud adherente, presencia y cuantía de armadura pasiva de confinamiento, eventuales sollicitaciones dinámicas,...
- 2.3. Desde el punto de vista operativo los ensayos descritos, tanto el ensayo LT como el ensayo LC son ensayos sencillos, seguros, fácilmente reproducibles, rápidos y sistemáticos. El recorrido relativo de los resultados de los ensayos de los dos pórticos de un mismo material es moderado, excepto en el caso del HL10-2, en que se apreció una cierta dispersión entre ambos ensayos, tanto en el ensayo LT como en el ensayo LC. Para cada dosificación deben realizarse como mínimo dos ensayos.
- 2.4. Se ha desarrollado un método semiempírico para la acotación de las longitudes de transmisión y de la longitud complementaria a tracción. El método parte de los valores de fuerza unitaria adherente (F.U.A.) obtenidos en los ensayos de pórtico LT y LC. Estos resultados permiten deducir cotas superiores e inferiores de la longitud de transmisión y de la longitud complementaria a tracción. La correlación entre estas predicciones y los valores de longitud de transmisión de los ensayos de prismas y vigas de HL y de HC realizados es aceptable. La correlación de estas predicciones con diversas normativas y formulaciones es adecuada, en especial con el Código Modelo.
- 2.5. La capacidad adherente instantánea de los hormigones ligeros en la zona de transmisión, evaluada a partir de la F.U.A. de los ensayos LT antes del deslizamiento generalizado, es superior (entre un 13% y un 70%) a la del hormigón convencional, excepto en el HL3-1 (-8%). La mayor capacidad adherente demostrada por la mayor parte de las probetas de HL en el ensayo LT implica que se generen tensiones de tracción elevadas, lo que pone en evidencia la necesidad de diseñar cuidadosamente las zonas de anclaje próximas al extremo, garantizando el confinamiento del hormigón y aumentando la capacidad de carga mediante armadura. En ninguna probeta ensayada se apreció fisuración por hendimiento durante el ensayo.
- 2.6. Durante la realización de los ensayos de pórtico, se ha constatado la sensibilidad de las dosificaciones empleadas de hormigón ligero a fenómenos de deslizamiento diferido.



- 2.7. En el ensayo LT, para valores elevados de deslizamiento (de varios milímetros), se alcanza una F.U.A. superior a la que se produce antes del deslizamiento. Este fenómeno creemos que está motivado por el efecto Hoyer y por la adherencia mecánica proporcionada por la huella helicoidal impresa por el cordón en el hormigón.
- 2.8. Las curvas de la F.U.A. respecto al deslizamiento superior obtenidas en el ensayo LC presentan un comportamiento creciente hasta que se produce el deslizamiento generalizado. A partir de ese instante, disminuye el valor de la F.U.A. Esto es debido a que en este ensayo no se produce el efecto Hoyer.

### 12.3. CONCLUSIONES RELATIVAS AL ENSAYO DE LOS PRISMAS

- 3.1. Se ha desarrollado un procedimiento para la fabricación y el ensayo de prismas pretensados de hasta cuatro metros de longitud. Se fabrica una bancada de pretensado a partir de los pórticos diseñados, de hasta 1000 kN de capacidad, en la que es posible reproducir diferentes tipos de transferencia de pretensado. En esta investigación se han fabricado prismas de sección transversal de 105×105 mm, con un solo cordón de pretensado de 15.2 mm centrado, y sin armadura de confinamiento.
- 3.2. Este ensayo posibilita la obtención de una gran cantidad de información experimental relativa a la forma de transferencia del pretensado, a través de instrumentación mecánica y electrónica. Estimamos que este método es el más preciso para medir la longitud de transmisión, la sensibilidad a la fisuración por hendimiento, la relación entre la fuerza de pretensado transferida y la penetración del pretensado, y la influencia de la cuantía de armadura de confinamiento. Además, la posición del pretensado en este ensayo es desfavorable respecto a la adherencia, lo que está del lado de la seguridad.
- 3.3. Se ha constatado que las leyes que relacionan la fuerza de pretensado transferida respecto al deslizamiento del pretensado, en los extremos activo y pasivo se ajustan a una ley potencial en ambos tipos de hormigón, según lo postulado por el CEB. Tan sólo durante el inicio y final de la transferencia los resultados experimentales presentan una cierta dispersión.
- 3.4. Las dimensiones adoptadas para la sección transversal de los prismas de pretensado se han determinado a partir de los recubrimientos utilizados habitualmente en fábricas de prefabricados. Estas dimensiones, desde el punto de vista de la fisuración observada han resultado suficientes en HC e insuficientes en HL. Este último material es incapaz de garantizar con un recubrimiento de 45 mm la transferencia de la fuerza de pretensado de forma duradera. Creemos que el motivo es la aparición de fisuración diferida por hendimiento, que se inicia transcurrido un cierto tiempo tras la transferencia (de varios días a varias semanas), y que se propaga gradualmente a lo largo de la mayor parte de la longitud del prisma.



- 3.5. Los valores de longitud de transmisión a la edad de transferencia en los tres tipos de hormigón son similares: en el anclaje más próximo al corte alcanzan 880, 872 y 837 mm para el HL10-1, HL3-1 y HC respectivamente; en el anclaje pasivo son de 911, 847 y 850 mm, respectivamente. Sin embargo, los valores de las longitudes de transmisión de los prismas de hormigón ligero no permanecen estables con el tiempo, y de hecho se producen valores de la longitud de transmisión que superan la mitad de la longitud del prisma. La longitud de transmisión del HC aumentó un 8% en el extremo activo durante el primer año. En el extremo pasivo permanece estable.
- 3.6. El grado de ajuste entre las medidas de los prismas procedentes de la instrumentación electrónica y mecánica es excelente. Además, ambos tipos de medida proporcionan datos complementarios. Las medidas de instrumentación electrónica proporcionan información durante y tras la transferencia, que posibilita conocer qué sucede en el cordón de pretensado y en la superficie lateral simultáneamente. Por otra parte, la instrumentación mecánica posibilita la medida de las deformaciones del hormigón antes de la transferencia, y a largo plazo tras la misma.
- 3.7. Las pérdidas producidas en bancada antes de la transferencia son elevadas, del orden del 2-3% de la fuerza de pretensado inicial. Estas pérdidas están motivadas por la relajación del pretensado, por el posible asentamiento diferido de las cuñas de anclaje y por la retracción/entumecimiento del hormigón en la bancada. El hormigón ligero presenta ocasionalmente entumecimiento en edades tempranas, lo que puede motivar disminución de la fuerza de pretensado registrada en los anclajes por las células de carga. Inmediatamente tras la transferencia las pérdidas de pretensado en los prismas fueron del 8% para los prismas de HC, del 10% para los prismas de HL3-1 y del 11% para los prismas de HL10-1.

## 12.4. CONCLUSIONES RELATIVAS AL ENSAYO DE LAS VIGAS

- 4.1. La instrumentación y fabricación de las vigas pretensadas en la planta de prefabricación fue un proceso laborioso, realizado en condiciones climáticas duras y fuertemente limitado por los plazos, sobre todo por la edad de transferencia. Las condiciones de trabajo dificultan extremadamente la instrumentación manual y electrónica. De las galgas extensométricas adheridas al pretensado, un 70% funcionaron correctamente tras el hormigonado.
- 4.2. Por lo que respecta a la longitud de transmisión de las vigas:
  - De los ensayos realizados en vigas se concluye que la longitud de transmisión tras la transferencia en vigas de HC con cercos de 8 mm a 15 cm está comprendida entre 540 y 910 mm.
  - De los ensayos realizados en vigas se concluye que la longitud de transmisión tras la transferencia en vigas de HL10-1, con cercos de 8 mm a 15 cm, está comprendida entre 527 y 544 mm. Al cabo de 6 meses, está comprendida entre 697 y 748. Por lo que respecta a la longitud de anclaje (para el límite elástico garantizado) está acotada superiormente por 4 m, a los diez meses de la transferencia.



- De los ensayos realizados en vigas se concluye que la longitud de transmisión tras la transferencia en vigas de HL10-2 con cercos de 8 mm a 15 cm está comprendida entre 595 y 1012.
- 4.3. Se ha comprobado que existen diferencias de tensión entre los diferentes cordones de pretensado. Además, hay que tener en cuenta que se obtiene la deformación del cordón a partir de la deformación longitudinal de un alambre exterior del cordón, cuando no todos los alambres han de deformarse lo mismo necesariamente (DENU91). Esto puede explicar la dispersión obtenida en los valores de deformaciones del pretensado.
  - 4.4. El ensayo de las vigas con dos cargas puntuales simétricas posibilitó que la zona central estuviese sometida únicamente a flexión constante (salvo efectos del peso propio) hasta el final del ensayo. La presencia de galgas dentro de la zona central posibilitó en todos los casos establecer la variación de deformación del pretensado inferior de la zona central, lo que no habría sido posible con un ensayo de una sola carga.
  - 4.5. Los criterios de disposición de armadura pasiva del Eurocódigo, para hormigón ligero (armadura transversal a cortante, radios de giro, longitudes de anclaje,...) han demostrado una gran eficacia: ninguna de las vigas ensayadas sufrió fisuración excesiva o agotamiento prematuro durante el ensayo, inducidos por la disposición deficiente de dicha armadura. Los criterios de armado para la armadura transversal de la zona de anclaje frente a fisuración por estallido, exfoliación y hendimiento (CALA99, CM90) no han sido adecuados para el HL.
  - 4.6. Tras la transferencia se estimaron unas tensiones máximas de la armadura de confinamiento de 100-175 MPa para las vigas de HL10-2 y de 55-80 MPa para las vigas de HC. En la armadura transversal a cortante, a pesar de haber sido dispuesta en forma de estribos abiertos para evitar el efecto de confinamiento, se estimaron tensiones del orden del 50% de las experimentadas por la armadura de confinamiento.
  - 4.7. El coeficiente de seguridad global de las vigas ensayadas fue en todos los casos superior a 2, entendiendo como coeficiente de seguridad global el cociente entre el momento último de la viga y el momento de fisuración detectado (MART93). El momento de fisuración de las vigas de HL10-1 fue inferior a la previsión teórica, de un 76% del correspondiente a las vigas de HC (150 mkN). El momento de fisuración de las vigas de HL10-2 un 80-85% del momento de fisuración de las vigas de HC.
  - 4.8. La rotura de las vigas de HL se produjo en el dominio 3, aunque la ductilidad de las vigas de HL10-2 fue muy superior. La ductilidad de las vigas de HC fue la más elevada: plastificó la armadura activa traccionada y no se alcanzó la rotura en ninguna de las dos vigas ensayadas, que presentaron flechas máximas de hasta 200 mm.
  - 4.9. Las pérdidas de pretensado por rozamiento, medidas en la segunda serie de vigas en el cordón superior, no superaron el 1%. Las pérdidas por penetración

de cuñas y posible desplome de los terminales de la bancada fueron de un 2.5% de media en el pretensado superior e inferior, lo que constituye un valor muy elevado para una bancada de 125 metros.

- 4.10. Las pérdidas instantáneas de pretensado son de un 10.4% de media para el HC, y se sitúan entre el 10.4 y el 11.5% para el HL.
- 4.11. Las pérdidas totales de pretensado, estimadas a los tres meses de la transferencia son del 18% para el HC, y se sitúan entre el 16% y el 20% para el HL (superiores en el HL10-1). Estos resultados se han determinado a partir de las deformaciones medidas en el pretensado, efectuando una corrección para tener en cuenta la relajación del pretensado.
- 4.12. A consecuencia del análisis de los resultados de los ensayos a flexión de las vigas se deduce que la longitud de anclaje de las vigas de HL10-1, fisuradas por hendimiento, es de 4 metros como máximo a la edad de ensayo de las vigas, para las cuantías de armadura de confinamiento adoptadas. En el caso del HL10-2 y del HC, los valores de la longitud de anclaje están acotados superiormente por 3.25 y 2.75 metros respectivamente, a los tres meses de edad tras la transferencia.
- 4.13. Con el tiempo, en las vigas de HL fisuradas puede producirse un aumento de la longitud de transmisión que conduce a unas pérdidas de pretensado elevadas que alcanzan la zona central. A consecuencia de esto, se puede producir una fragilización de la rotura, perdiendo valor el concepto de longitud de anclaje.

## 12.5. CONCLUSIONES RELATIVAS A LA ZONA DE TRANSMISIÓN

- 5.1. La excesiva adherencia que se produce entre el cordón y el HL es la responsable de que se generen tensiones de tracción elevadas en la zona de transmisión. Estas tensiones pueden originar la fisuración del hormigón debido a:
  - La menor resistencia a tracción del hormigón ligero, a la que se añade la debilidad a tracción del propio árido.
  - El fenómeno de cansancio a tracción (FOUR85a, FOUR85b).
  - La menor energía de fractura del HL respecto al HC (CURR95).
  - La menor deformabilidad transversal del hormigón ligero.
- 5.2. En las vigas fabricadas con diferentes cuantías de armadura de confinamiento, la presencia de ésta conduce a valores menores de la longitud de transmisión a la edad de transferencia. Las reducciones obtenidas son hasta un 40% inferiores respecto a los valores obtenidos en los prismas de pretensado centrado (sin armadura de confinamiento). La presencia de armadura de confinamiento también conduce a valores menores de penetración del pretensado durante la transferencia.
- 5.3. La cuantía de armadura de confinamiento empleada no ha logrado evitar la propagación de la fisuración longitudinal hacia el interior de las vigas de HL,



pero ha conseguido limitar la extensión de la longitud de transmisión. Tras la transferencia se produjo una estabilización de este valor, de modo que la longitud de transmisión no superó los 1550 mm (según el método lineal) en ninguna viga.

- 5.4. La fisuración de hendimiento se propagó progresivamente hacia el interior de las vigas, más allá de la zona de transmisión. En esta zona las fisuras sólo pueden ser debidas a las tensiones de estallido, dado que en la zona central no hay apenas variación de la fuerza de pretensado. Estas tensiones son originadas por la recuperación de diámetro del cordón de pretensado debido al efecto Poisson, consecuencia a su vez de las pérdidas de pretensado tras el endurecimiento del hormigón: cuanto mayores sean las pérdidas, mayor es el valor de estas tensiones. El hormigón ligero HL ha sido incapaz de resistir las tensiones transversales originadas por este efecto.
- 5.5. Se han detectado aumentos de deformación del pretensado traccionado en la zona de transmisión durante el ensayo de las vigas a flexión. El aumento de deformación en esta zona es marcadamente lineal con el momento actuante. Esto contradice el modelo propuesto por Hanson y Kaar (HANS59), que establece que durante la carga de la viga, mientras el pretensado esté correctamente anclado, sólo se produce aumento de tensión del pretensado en la zona complementaria a tracción.
- 5.6. La transferencia súbita en las vigas conduce a valores de longitud de transmisión elevados. Por ello es recomendable la fabricación de bloques de amortiguación contiguos a la zona de corte, y entre ambos extremos de la bancada y las vigas contiguas a estos. Esta práctica se llevó a cabo durante la fabricación de la segunda serie de vigas. Los daños apreciados en los extremos de las vigas, y los valores medidos de longitudes de transmisión fueron considerablemente menores en la segunda serie.

## 12.6. CONCLUSIONES RELATIVAS A LA ZONA COMPLEMENTARIA A TRACCIÓN

- 6.1. Si comparamos las propiedades tensodeformacionales del HL y el HC, el primero presenta una elevada linealidad del diagrama tensión-deformación, una menor área bajo la rama plástica del diagrama tensión-deformación a compresión, valores reducidos de deformación del hormigón en rotura a compresión (E21496) y una menor resistencia a tracción que el HC. Esto, unido a las pérdidas de pretensado más elevadas de este material, conduce a una menor ductilidad de las vigas pretensadas de HL, en relación a las de hormigón convencional.
- 6.2. La relación entre los valores de la F.U.A. de los ensayos LT y de los ensayos LC, estimadas para un mismo material y la misma edad de ensayo, está comprendida entre 1.5 y 3.5 para los ensayos "instantáneos", y entre 2.3 y 2.8 para los ensayos mantenidos durante varios días. Por ello se deduce que la capacidad adherente de la zona de transmisión es superior a la de la zona complementaria a tracción, lo que concuerda con los resultados de otros



investigadores (ABRI93, DENU91). Esta diferencia se debe al efecto Hoyer y a la adherencia mecánica derivada de la forma del cordón, que actúa como un anclaje a medida que disminuye la tensión.

## 12.7. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LAS PREDICCIONES ANALÍTICAS Y LAS DISTINTAS NORMATIVAS

- 7.1. Se han planteado dos métodos de estimación de la longitud de transmisión alternativos: método lineal y el método exponencial. A partir de la medida de las deformaciones: el ajuste se realiza minimizando el error cuadrático entre la ley experimental y la ley teórica, siendo las variables los coeficientes de las curvas. La bondad del ajuste se realiza mediante el coeficiente  $R^2$  obtenido en cada una de las zonas de transmisión.
- 7.2. Atendiendo a los resultados obtenidos con ambos métodos, se deduce que el método exponencial se ajusta mejor que el método lineal para estimar longitudes de transmisión “convergentes” en el HL. En el HC ningún método muestra mayor eficacia que el otro. La precisión de ambos métodos es limitada en el caso de las vigas, debido a que existen pocos datos en la zona de transmisión.
- 7.3. Se ha realizado un análisis comparativo de los valores de la longitud de transmisión de ambos tipos de material tras la transferencia, con la estimación de la cota superior de la longitud de transmisión planteada por el Código Modelo para elementos de HC. Extrapolando esta formulación a los elementos de HL, se ha constatado que las estimaciones proporcionadas por el CM están del lado de la seguridad respecto a los valores experimentales, y que el grado de ajuste es óptimo.
- 7.4. Para estimar la cota inferior de la longitud de transmisión se recomienda el método de acotación de la longitud de transmisión propuesto, basado en los resultados experimentales del ensayo de pórtico LT. Este método muestra un grado de ajuste aceptable. El valor de la cota inferior permitiría evaluar la sensibilidad frente a fisuración diferida por hendidamiento.
- 7.5. La longitud complementaria a tracción del ensayo de presenta un ajuste razonable con la predicción de la FHWA (FHWA94), concebida para elementos sin fisuración en la zona de anclaje. Por otra parte, las cotas inferiores de la longitud complementaria estimadas a partir del ensayo de pórtico LC (mediante la F.U.A. máxima) presentan una gran similitud con la formulación del Código Modelo (lo que es lógico, dado que los ensayos en los que se basa esta última formulación son ensayos de tipo “pull-out” sobre cordones de pretensado sin tensión).
- 7.6. Los valores de recubrimiento mínimo del Eurocódigo 2, parte1-4, relativa al hormigón ligero de textura cerrada, no han sido suficientes para prevenir o limitar la fisuración transversal en la zona de anclaje del HL. Por otra parte, la longitud de transmisión de los prismas ha superado con el tiempo los valores



estimados a partir de la formulación del Eurocódigo. Los efectos diferidos, que no están contemplados en la formulación del Eurocódigo, han demostrado tener una gran incidencia sobre la capacidad adherente de la zona de transmisión, y de anclaje en general.

## **12.8. CONCLUSIONES RELATIVAS A LA VIABILIDAD DEL USO DEL HL EN GRANDES ELEMENTOS PREFABRICADOS PRETENSADOS**

- 8.1. El hormigón ligero HL10-2 presenta una densidad de equilibrio superior a  $2000 \text{ kp/m}^3$ . La resistencia a tracción directa media, a la edad de transferencia de las vigas, de tres días, es igual a la resistencia a tracción media del HC a la edad de dos días (edad de transferencia habitual en fábrica). Sin embargo, todas las vigas fabricadas con este material fisuraron longitudinalmente en los extremos, generalizándose la fisuración a lo largo de toda la viga. Este hecho es paradójico: un hormigón teóricamente cubierto por la normativa EHE, con mejores propiedades resistentes a la edad de transferencia que el hormigón convencional, a su edad de transferencia habitual, presenta incapacidad para retener de forma duradera, sin más carga aplicada que el peso propio, la fuerza de pretensado transferida. En la bibliografía no se encontró referencia alguna a fenómenos de este tipo.
- 8.2. La ejecución de las zonas de anclaje de los cordones de pretensado de armadura pretesa de 15.2 mm, con las separaciones y recubrimientos habituales, a partir de hormigón ligero de arcilla expandida no es adecuada, a nuestro juicio, por la necesidad de una elevada cuantía de armadura transversal para absorber las tracciones transversales que se generan, y que el hormigón no es capaz de soportar. La presencia de fisuración longitudinal en la zona de anclaje es incompatible con las exigencias de durabilidad.
- 8.3. Creemos que la solución a este problema pasa por:
  - La reducción de la adherencia entre pretensado-hormigón: empleo de cordones de pretensado compactos, empleo alternativo de tendones no metálicos con acabado superficial adecuado. Como contrapartida, las longitudes de transmisión y anclaje aumentan, lo que implica una reducción de la capacidad resistente de las vigas en las zonas afectadas.
  - La disminución de la fuerza de pretensado aplicada, por unidad de superficie de la sección transversal. Para ello puede plantearse el uso de cordones de pretensado a cordones de 12 mm (30% menos de sección resistente), o disminuir la tensión de tesado, y disponer mayores recubrimientos y separación entre cordones.
  - El aumento de la capacidad resistente del hormigón a tracción a la edad de transferencia: posponiendo la edad de transferencia, modificando las dosificaciones mediante el uso de adiciones como humo de sílice, y empleando de áridos ligeros reactivos (como las escorias aglomeradas), o fibras en la dosificación.



## 12.9. RECOMENDACIONES

- 9.1. En la EHE se excluye del campo de aplicación a los hormigones ligeros (EHE98, 1). A nuestro juicio, se podría matizar la definición de hormigón ligero de la EHE del siguiente modo: “el hormigón cuya densidad seca esté comprendida entre 1200 y 2000  $\text{kp/m}^3$ , o aquel que, presentando densidad superior, se fabrique a partir de áridos de densidad de grano inferior a  $x \text{ t/m}^3$ , que estén presentes en una proporción en peso superior al  $y\%$ ”, donde los valores  $x$  e  $y$  deberían ser determinados experimentalmente.
- 9.2. Actualmente la longitud de anclaje se define en la EHE como “la necesaria para garantizar la resistencia del anclaje por adherencia, hasta la rotura del acero” (EHE98, 67.4). Para adecuar la definición al planteamiento de E.L. Últimos creemos que se podría redefinir como “la necesaria para garantizar la resistencia del anclaje por adherencia, hasta alcanzar la tensión de cálculo en la armadura activa”. Realmente la longitud de anclaje varía según el dominio en que esté diseñada la viga: en dominio 3, es suficiente con garantizar el anclaje de una fuerza correspondiente al límite elástico garantizado del acero.
- 9.3. Se recomienda en la práctica el control de la potencia consumida por la amasadora durante el proceso de amasado, para valorar la consistencia del hormigón y fijar el final de amasado de una manera efectiva. Esta medida permitiría además adecuar las dosis de plastificantes, con el consiguiente ahorro. Este control sería complementario a la realización del ensayo de cono de Abrams en el lugar de colocación del hormigón. Esta medida tiene especial relevancia para los hormigones fabricados con el aditivo plastificante Glenium 52, dado que requieren una energía de amasado superior, y su caracterización en estado fresco requiere de más información que la proporcionada por el cono de Abrams.
- 9.4. Las fisuras de hendimiento en las vigas de hormigón ligero a menudo comienzan y/o se bifurcan en donde hay separadores. Es necesario garantizar que el pretensado esté absolutamente rodeado de hormigón. Por otra parte, en las vigas de hormigón ligero los radios mínimos de doblado recomendados para la armadura pasiva son un 30% superiores a los correspondientes al HC (E21496, E21193). Esto conduce a que, para garantizar la misma separación entre la armadura transversal y el pretensado sea necesario aumentar el recubrimiento de los cordones a 57.5 mm como mínimo, lo que supone un aumento del 15%. Dada la tendencia del HL a fisurar, sería recomendable estudiar la posibilidad de establecer una distancia mínima entre los cordones de pretensado y la armadura transversal de la zona de anclaje. Estas medidas supondrían una disminución del canto útil de la sección de pretensado.

## 12.10. PERSPECTIVAS DE FUTUROS TRABAJOS

Sería deseable profundizar en la búsqueda de un ensayo de caracterización de las propiedades adherentes del pretensado que fuese representativo, sistemático, reproducible y económico, y que permitiese cuantificar la incidencia de las diferentes variables que condicionan la adherencia. Para ello se propone desarrollar el ensayo de los pórticos dadas las ventajas señaladas en este trabajo.



Paralelamente, sería conveniente profundizar en el estudio de la incidencia de determinadas variables en el comportamiento estructural: el efecto que tienen las solicitaciones permanentes, las acciones dinámicas sobre la longitud de anclaje de las vigas pretensadas, el efecto del enfundado de los extremos de los cordones de pretensado,... En la normativa no se hace referencia a este último, que constituye un práctica habitual en prefabricación.

De entre las variables que condicionan la adherencia del cordón de pretensado, sería conveniente evaluar la incidencia del empleo de los distintos jabones de trefilado en la longitud de transmisión; en general, el efecto que los diferentes acabados superficiales o el grado de oxidación tienen sobre la capacidad adherente.

Dado que la edad de transferencia condiciona la productividad de las bancadas de pretensado y, por lo tanto, la rentabilidad de las empresas de prefabricación, juzgamos preciso investigar sobre los límites inferiores de la edad de transferencia, atendiendo a:

- La ausencia de fisuración en la zona de anclaje, instantánea y diferida, dado que en el presente trabajo no se ha conseguido relacionar la aparición de fisuras con las propiedades mecánicas básicas del material.
- La limitación de las deformaciones diferidas de las vigas prefabricadas.
- La limitación de las pérdidas de pretensado instantáneas y totales, condicionada por el punto anterior.

Se podría perfeccionar el método de estimación de la longitud de transmisión a partir de las deformaciones medidas en el paramento de los elementos pretensados, desarrollado en este trabajo. Estimamos que se obtendría una correlación superior con los datos experimentales suponiendo una ley teórica de la deformación del hormigón  $f(x) = a_1 + b_1 x + c_1 e^{d_1 x}$  en la zona de transmisión. Con este ajuste, método lineal/exponencial, se podrían determinar los pesos  $a_1, b_1, c_1$  que cada una de las funciones componentes tiene sobre la deformación total.

La continuación de la investigación sobre la viabilidad de fabricar vigas pretensadas de hormigón ligero podría orientarse del siguiente modo:

- Investigación exhaustiva acerca de los coeficientes de cansancio a tracción de hormigones de alta resistencia convencionales y de áridos ligeros, como los estudiados en esta investigación, frente a esfuerzos de tracción y compresión.
- Convendría profundizar en el estudio de los fenómenos de adherencia del hormigón-pretensado mediante modelos numéricos de análisis no lineal. De esta forma, considerando las propiedades tensodeformacionales instantáneas y diferidas de los materiales, se podrían predecir los valores de las tensiones transversales máximas, a fin de desarrollar criterios de armado.
- Durante las últimas décadas, se ha investigado el empleo alternativo de armadura activa adherente, metálica o no metálica, de diferentes tipos. Creemos que sería deseable profundizar en este campo, tanto para el hormigón convencional como para el hormigón ligero.





## **BIBLIOGRAFÍA**

- Abrishami, H.H.; *Studies on Bond and Cracking of Structural Concrete*; Tesis Doctoral; University Microfilms International; 1994.
- Aguado de Cea, A.; *Hormigones Ligeros: Clasificaciones y Características*; Máster en Edificación; 1990.
- Aguado de Cea, A.; *Hormigones Ligeros: Ventajas, Inconvenientes y Aplicaciones*; Máster en Edificación; 1990.
- Aguado de Cea, A.; *Perspectivas de Futuro del Campo del Hormigón*; Seminario Nuevos Materiales; Sitges, 1989.
- Aguado, A.; Montobbio, X.; *Nueva Formulación para el Cálculo de Pérdidas de la Fuerza de Pretensado por Penetración de Cuñas*; Hormigón y Acero; No. 192, pp. 73-79; A.T.E.P.; 1994.
- Amillátegui, F.S., Pericot, C.G.; *Curso de Hormigón Pretensado*; E.T.S.I.C.C.P. Madrid, 1986.
- Berner, D.E.; Polivka, B.C.; Gerwick, B.C., Jr; Pirtz, D.; *Behavior of Prestressed Lightweight Concrete Subjected to High-Intensity Cyclic Stress at Cryogenic Temperatures*; ACI Journal; pp. 727-736; Septiembre-Octubre, 1986.
- Berra, M.; Ferrara, G.; *Normalweight and Total-Lightweight High-Strength Concretes: A Comparative Experimental Study*; pp. 701-733.
- Brooks, M.D.; Gerstle, K.H.; Logan, D.R.; *Effect of Initial Strand Slip on the Strength of Hollow-Core Slabs*; PCI Journal; pp. 90-111; Enero-Febrero, 1988.
- Bruggeling, A.S.G.; *Structural Concrete. Theory and its Application*; A.A. Balkema, Brookfield; Rotterdam, 1991.
- Buckner, C.D.; *An Analysis of Transfer and Development Lengths for Pretensioned Concrete Structures*; U.S. Department of Transportation, FHWA; Virginia, 1994.
- Cairns, J.; Abdullah, R.; *An Evaluation of Bond Pullout Tests and their Relevance to Structural Performance*; The Structural Engineer; Vol. 73, No. 11, pp. 179-185; Junio, 1995.
- Calavera, J. et al.; *Manual de Ferralla*; Asociación Nacional de Industriales de Ferralla, 1997.
- Calavera, J.; *Manual de Detalles Constructivos en Obras de Hormigón Armado y Pretensado*; INTEMAC; 1993.

- Chinenkov, Y.V.; Volkov, I.; Romanov, Y.M.; *The Properties of Hardened Concrete with Lightweight Porous Aggregates*; Proceedings of the Second International Congress on Lightweight Concrete, Concrete International; pp. 63-72; The Construction Press, Lancaster, England; 1980.
- Collins & Mitchell; *Prestressed Concrete Basics*; Structural CPCI Architectural, 1ª ed.; 1987.
- Corres Peiretti, H.; León González, J.; López Agui, J.C.; *Prontuario Informático del Hormigón Armado*; Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, 1995.
- Cousins, T.E.; Francis, L.H.; Stallings, J.M.; Gopu, V.; *Spacing and Concrete Cover Requirements for Epoxy-Coated Prestressing Strand in Unconfined Sections*; PCI Journal; pp. 76-84; Septiembre-Octubre, 1993.
- Delibes Liniers, A.; *Tecnología y Propiedades Mecánicas del Hormigón*; 2ª edición; INTEMAC; 1996.
- Domenico, N.G.; Mahmoud, Z.I.; Rizkalla, S.H.; *Bond Properties of Carbon Fiber Composite Prestressing Strands*; ACI Structural Journal; pp. 281-290; ACI; Mayo-Junio, 1998.
- Ensayos de Hormigón, Morteros y sus Componentes*; AENOR; Madrid, 1995.
- F.I.P.; *Planning and Design Handbook on Precast Building Structures*; SETO, London; 1994.
- Fernández Casado, C.; *Puentes de Hormigón Armado y Pretensado I*; pp. 409-427; Editorial Dossat, S.A., Madrid, 1961.
- Gálvez Ruiz, J.; *Influencia de la Rugosidad y la Cuantía de Armadura Transversal en el Comportamiento de las Piezas Compuestas Solicitadas a Flexión*; Tesis Doctoral; E.T.S.I.C.C.P., Universidad Politécnica de Madrid; Julio, 1992.
- González-Isabel, G.; *Hormigón de Alta Resistencia*; 1994.
- Grattasat, G.; *Concepción de Puentes. Tratado General*; Editores Técnicos Asociados; Barcelona, 1981.
- Grupo Español del Hormigón; *Caracterización de las Propiedades Diferidas del Hormigón y su Incidencia Estructural*; Boletín No. 22; Junio, 1998.
- Hahn, J.; *Vigas Continuas, Pórticos, Placas y Vigas sobre Apoyo Elástico*; 499 pp.; Gustavo Gili; Barcelona, 1982.
- Holm, T.A.; Bremner, T.W.; Newman, J.B.; *Lightweight Aggregate Concrete Subject to Severe Weathering*; Concrete International; pp. 49-54; Junio, 1984.
- Holm, T.A.; *Physical Properties of High Strength Lightweight Aggregate Concretes*; Proceedings of the Second International Congress on Lightweight Concrete, Concrete International; pp. 187-204; The Construction Press, Lancaster, England; 1980.
- Holmberg, A.; Lindgren, S.; *Anclaje y Transmisión del Pretensado*; Hormigón y Acero; No. 99, pp. 7-32; A.T.E.P.; 2º Trimestre, 1971.
- Horn, D.G.; Preston, H.K.; *Use of Debonded Strands in Pretensioned Bridge Members*; PCI Journal; pp. 43-58; Julio-Agosto, 1981.



- Instituto Técnico de Materiales y Construcciones; *Ensayo hasta Rotura por Flexión de una Viga Gamo*; INTEMAC; Doc. IN/LC-36014; pp. 1-5; Mayo, 1996.
- Jiménez Montoya, P.; García Meseguer, A.; Morán Cabré, F.; *Hormigón Armado*; Ed. Gustavo Gili; Barcelona, 1991.
- Keuser, M.; Mehlhorn, G.; *Finite Element Models for Bond Problems*; Journal of Structural Engineering; Vol. 113, No. 10, pp. 2160-2173; ASCE; Octubre, 1987.
- Kong & Evans; *Reinforced and Prestressed Concrete*; 3ª ed., Chapman and Hall; 1994.
- König, G.; *Control of Cracks in Reinforced Concrete and Prestressed Concrete*; Proceedings of the Tenth International Congress of the FIP, New Delhi; Vol. I, pp. 259-268; FIP; Febrero, 1986.
- König, G.; Tue, N.; *Method to Solve Bond Differential-Equation System in Prestressed Concrete*; Journal of Engineering Mechanics; Vol. 119, No. 10, pp. 2194-2206; ASCE; Octubre, 1993.
- Koskisto, O.J.; Ellingwood, B.R.; *Reliability-based Optimization of Plant Precast Concrete Structures*; Journal of Structural Engineering; Vol. 123, No. 3, pp. 298-304; Marzo, 1997.
- Kotsovos, M.D.; Pavlovic, M.N.; *Structural Concrete. Finite-Element Analysis for Limit State Design*; Thomas Telford Publications; London, 1995.
- Kurz, W.; *Concrete Bars. Anchorage Behaviour*; Darmstadt Concrete; Vol. 9, pp. 11-15; 1994.
- Leonhardt, F.; Mönnig, E.; *Estructuras de Hormigón Armado. Tomo II: Casos Especiales del Dimensionado de Estructuras de Hormigón Armado*; Librería El Ateneo, 1990.
- Libby, J.R.; *Modern Prestressed Concrete*; 4ª ed., Van Nostrand Reinhold Book; New York, 1990.
- Logan, D.R.; *Acceptance Criteria for Bond Quality of Strand for Pretensioned Prestressed Concrete Applications*; PCI Journal; Vol. 42, No. 2, pp. 52-90; Marzo-Abril, 1997.
- Loov, R.E.; *A General Equation for the Steel Stress for Bonded Prestressed Concrete Members*; PCI Journal; pp. 108-137; Noviembre-Diciembre, 1988.
- Macías Amat, F.J.; Martínez Abella, F.; Vázquez, C.; *Obtención de un Hormigón de Alta Resistencia Mediante el Empleo de Materiales Gallegos: Selección del Árido, Dosificaciones y Propiedades Mecánicas*; 1998.
- Marí Bernat, A.R.; *Modelos Unidimensionales para el Análisis No Lineal en el Tiempo de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado*; Grupo Español del Hormigón, Comisión II: Análisis Estructural; E.T.S.E.C.C.P. Barcelona, UPC; 1989.
- Marí, A.; Aguado, A.; Agulló, L.; Martínez, F.; Cobo, D.; *Hormigón Armado y Pretensado. Ejercicios*; 1999.
- Martínez, F. et al.; *Adherencia entre el Hormigón y el Acero en Elementos Pretensos del Hormigón de Altas Prestaciones Iniciales: Objetivos del Proyecto y Planteamiento de los Ensayos*; 1º Congreso de Puentes y Estructuras de la

- Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE); Noviembre, 1999.
- Mattheiss, J.; *Hormigón Armado, Armado Aligerado, Pretensado*; Editorial Reverté, S.A.; 1980.
- Mattock, A.H.; *Modification of ACI Code Equation for Stress in Bonded Prestressed Reinforcement at Flexural Ultimate*; ACI Journal; pp. 331-339; Julio-Agosto, 1984.
- Mays, G.C.; Barnes, R.A.; *The Performance of Lightweight Concrete Structures in Service*; The Structural Engineer; Vol. 69, No. 20, pp. 151-160; Octubre, 1991.
- Millet, G.H.; *Properties of Cyanocrylates-An Overview*; Adhesives Age; pp. 27-32; Octubre, 1981.
- Nadim Hassoun, M.; *Structural Concrete*; Library of Congress-Cataloging-in-Publication Data; 1998.
- Navarrina Martínez, F.L.; Casteleiro Maldonado, M.; *Métodos Numéricos en Ingeniería*; Vols. I y II; Sociedad Española de Métodos Numéricos en Ingeniería; Barcelona, 1993.
- Navarrina Martínez, F.L.; *Una Metodología General para Optimización Estructural en Diseño Asistido por Ordenador*; Tesis Doctoral; Universidad Politécnica de Cataluña; 1987.
- Newman, J.B.; Bremner, T.W.; *The Testing of Structural Lightweight Concrete*; Proceedings of the Second International Congress on Lightweight Concrete, Concrete International; pp. 152-171; The Construction Press, Lancaster, England; 1980.
- P.T.I.; *Recommendations for Prestressed Rock and Soil Anchors* (Revised 1996); Post-Tensioning Institute; Phoenix, USA, 1996.
- Pérez Caldentey, A.; *Comportamiento en Servicio del Hormigón Estructural. Estudio Teórico y Experimental*; Tesis Doctoral; Universidad Politécnica de Madrid; 1996.
- RILEM; *Specification for the Test to Determine the Bond Properties of Prestressing Tendons*; Materials and Structures; Vol. 6, No. 35; Septiembre-Octubre, 1979.
- Serrà Martín, I.; *Estudio Experimental del Comportamiento de Vigas de Hormigón Armado Descimbradas a Tempranas Edades*; Tesis Doctoral, presentada en Noviembre de 1994; GEHO-CEB, Grupo Español del Hormigón; 1996.
- Serrà, I.; Marí, A.R.; Martínez Abella, F.; López Almansa, F.; *Experimental Measurements of Creep and Shrinkage of Early Demolded Reinforced Concrete Beams*; RILEM, Proceedings of CONCREEP 5; Barcelona, 1993.
- Sierra Bravo, R.; *Tesis Doctorales y Trabajos de Investigación Científica*; Editorial Paraninfo; Madrid, 1994.
- Sirvent Casanova, I.; *Tecnología y Terapéutica del Hormigón Armado*, Tomo I; Instituto Técnico de la Construcción; Alicante, 1997.
- Sobrino Almunia, J.A.; *Evaluación del Comportamiento Funcional y de la Seguridad Estructural de Puentes Existentes de Hormigón Armado y Pretensado*; Tesis Doctoral; Universidad Politécnica de Cataluña; 1994.



- Swamy, R.N.; Jones, R.; Chiam, A.T.P.; *Influence of Steel Fibers on the Shear Resistance of Lightweight Concrete I-beams (Reinforced Concrete)*; ACI Structural Journal; pp. 103-114; ACI; Enero-Febrero, 1993.
- Taylor, H.P.J.; *Measurement of Transfer Lengths on Pretensioned Concrete Elements: Discussion by Howard P. Taylor*; Journal of Structural Engineering; Octubre, 1998.
- U.S. Department of Transportation, FHWA; *An Analysis of Transfer and Development Lengths for Pretensioned Concrete Structures*, FHWA/RD-94-049; Turner-Fairbank Highway Research Center; Virginia, 1994.
- U.S. Department of Transportation, FHWA; *Criteria for Designing Lightweight Concrete Bridges*; National Technical Information Service; FHWA/RD-85-045; Final Report; Federal Highway Administration; Agosto, 1985.
- UNE 36-098-94 *Barras Corrugadas de Acero Soldable para Armaduras de Hormigón Pretensado*; 1994.
- UNE 36-422-85 *Ensayo de Relajación Isotérmica de Armaduras de Acero para Pretensar*; 1985.
- Vaysburd, A.M.; *Durability of Lightweight Concrete Bridges in Severe Environment*; Concrete International; pp. 33-38; Julio, 1996.
- Vázquez, C.; Martínez, F.; Herrador, M.F.; Rabuñal, J.R.; *Adherencia entre el Hormigón y el Acero en Elementos Pretensos del Hormigón de Altas Prestaciones Iniciales: Desarrollo Experimental y Resultados*; 1<sup>er</sup> Congreso de Puentes y Estructuras de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE); Noviembre, 1999.
- Vera Sorbino, R.; *Anclaje de Armaduras Pasivas en los Hormigones Endurecidos*; Tesis Doctoral; Universidad Politécnica de Valencia; 1992.
- Virlogeux, M.M.; *On Site and Laboratory Testing of Lightweight Aggregate Concrete*; Proceedings of the Second International Congress on Lightweight Concrete, Concrete International; pp. 261-276; The Construction Press, Lancaster, England; 1980.
- Wang, P.T.; Shah, S.P.; Naaman, A.E.; *Stress-Strain Curves of Normal and Lightweight Concrete in Compression*; ACI Journal; pp. 603-611; Noviembre, 1978.
- Zhang, M.; Gjorv, O.E.; *Characteristics of Lightweight Aggregates for High-Strength Concrete*; ACI Materials Journal; Vol. 88, No. 2, pp. 150-158; ACI; Marzo-Abril, 1991.
- Zhang, M.; Gjorv, O.E.; *Mechanical Properties of High-Strength Lightweight Concrete*; ACI Materials Journal; Vol. 88, No. 3, pp. 240-247; ACI; Mayo-Junio, 1991.





## REFERENCIAS

- ABEN97 Abendroth, R.E.; Stuart, R.A.; Yuan, D.; *Epoxy-Coated and Uncoated Strand Transfer Lengths for PC Panels*; Journal of Structural Engineering; Vol. 123, No. 5, pp. 550-560; ASCE; Mayo, 1997.
- ABRI92 Abrishami, H.H.; Mitchell, D.; *Simulation of Uniform Bond Stress*; ACI Materials Journal; Vol. 89, No. 2, pp. 161-168; ACI; Marzo-Abril, 1992.
- ABRI93 Abrishami, H.H.; Mitchell, D.; *Bond Characteristics of Pretensioned Strand*; ACI Materials Journal; Vol. 90, No. 3, pp. 228-235; ACI; Mayo-Junio, 1993.
- ABRI96 Abrishami, H.H.; Mitchell, D.; *Analysis of Bond Stress Distributions in Pullout Specimens*; Journal of Structural Engineering; Vol. 122, No. 3, pp. 255-261; ASCE; Marzo, 1996.
- ACIC92a ACI Committee 304; *Batching, Mixing, and Job Control of Lightweight Concrete*; American Concrete Institute, Michigan, 1ª ed.; 1992.
- ACIC92b ACI Committee 408; *State-of-the-Art Report on Bond under Cyclic Loads*; American Concrete Institute, Michigan, 1ª ed.; 1992.
- ACIC97 ACI Committee 213; *Guide for Structural Lightweight Concrete*; American Concrete Institute, Michigan, 3ª ed.; 1997.
- ACIC99 ACI Committee 318; *Building Code Requirements for Structural Concrete (318-99) and Commentary (318R-99)*; American Concrete Institute, Michigan, 1ª ed.; 1999.
- ALKU75 Al-Kubaisy, M.A.; Young, A.G.; *Failure of Concrete under Sustained Tension*; Magazine of Concrete Research; Vol. 27, No. 92, pp. 171-178; Septiembre, 1975.
- ANDE76 Anderson, A.R.; Anderson, R.G.; *An Assurance Criterion for Flexural Bond in Pretensioned Hollow-Core Units*; ACI Journal; Vol. 73, No. 8, pp. 457-464; Agosto, 1976.
- ARLI96 *Arlita Manual General*; Ingoprint, S.A.; Barcelona, 1996.
- ARMS49 Armstrong, W.E.I.; *Bond in Prestressed Concrete*; Journal of the Institution of Civil Engineers; Vol. 33, No. 1, pp. 19-40; Noviembre, 1949.
- BARD80 Bardhan-Roy, B.K.; Bobrovski, J.; *Design Considerations for Prestressed Lightweight Aggregate Concrete*; Proceedings of the Second International

- Congress on Lightweight Concrete, Concrete International; pp. 125-140; The Construction Press, Lancaster, England; 1980.
- BARR98 Barra, M.; Vázquez, E.; *Properties of Concretes with Recycled Aggregates: Influence of Properties of the Aggregates and their Interpretation*; Use of Recycled Concrete Aggregate; pp. 19-30; Thomas Telford Publishing; 1998.
- BASE57 Base, G.D.; *Some Tests on the Effect of Time on Transmission Length in Pre-Tensioned Concrete*; Magazine of Concrete Research; pp. 73-83; Agosto, 1957.
- BREA90 Brearley, L.D.; Johnston, D.W.; *Pull-Out Bond Tests of Epoxy Coated Prestressing Strand*; Journal of Structural Engineering; Vol. 116, No. 8, pp. 2236-2252; Agosto, 1990.
- CALA99a Calavera Ruiz, J.; *Proyecto y Cálculo de Estructuras de Hormigón*; Tomo I; INTEMAC; 1999.
- CALA99b Calavera Ruiz, J.; *Proyecto y Cálculo de Estructuras de Hormigón*; Tomo II; INTEMAC; 1999.
- CEA00 Cea Gómez, L.; *Aproximación a la Caracterización del Comportamiento Hidráulico de los Hormigones mediante la Identificación de Parámetros*; Proyecto Técnico; ETSICCP, Universidade da Coruña; Septiembre, 2000.
- CEBT87 CEB, Task Group VI/1, Anchorage Zones; Bulletin d'Information N° 181 *Anchorage Zones of Prestressed Concrete Members State-of-the-Art Report*; CEB, Lausanne, 1987.
- CHAN90 Chandler, I.J.; *Transmission Lengths of Pretensioned Tendons from Measurements of Pull-in*; Senior Lecturer, Civil Engineering, Curtin University of Technology; pp. 131-135; Noviembre, 1990.
- CHON91 Chong Key, C.; *Development Length of Prestressing Strand*; Tesis Doctoral presentada en 1991; UMI, University Microfilms International; 1991.
- CM90 CEB-FIP; *Código Modelo CEB-FIP 1990 para Hormigón Estructural*; Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos; 1990.
- COUS86a Cousins, T.E.; *Bond of Epoxy Coated Prestressing Strand*; Tesis Doctoral; University Microfilms International; 1986.
- COUS86b Cousins, T.E.; Johnston, D.W.; Zia, P.; *Bond of Epoxy Coated Prestressing Strand*; Final Report, Research Project, Center for Transportation Engineering Studies; North Carolina States University; Diciembre, 1986.
- COUS90a Cousins, T.E.; Johnston, D.W.; Zia, P.; *Transfer Length of Epoxy-Coated Prestressing Strand*; ACI Materials Journal; Vol. 87, No. 3, pp. 193-203; ACI; Mayo-Junio, 1990.
- COUS90b Cousins, T.E.; Johnston, D.W.; Zia, P.; *Transfer and Development Length of Epoxy Coated and Uncoated Prestressing Strand*; PCI Journal; pp. 92-103; Julio-Agosto, 1990.
- COUS95 Cousins, T.; Stallings, J.M.; Simmons, M.B.; *Reduced Strand Spacing in Pretensioned, Prestressed Members*; ACI Structural Journal; Vol. 91, No. 3, pp. 277-286; ACI; Marzo-Abril, 1995.



- CURR95 CUR Report 173; *Structural Behavior of Concrete with Coarse Lightweight Aggregates*; Centre for Civil Engineering Research and Codes; CUR, Gouda; Netherlands, 1995.
- DEAT94 Deatherage, J.H.; Burdette, E.G.; Chong, C.; *Development Length and Lateral Spacing Requirements of Prestressing Strand for Prestressed Concrete Bridge Decks*; PCI Journal; pp. 70-83; Enero-Febrero, 1994.
- DENU91 Den Uijl, J.A.; *Background of the CEB-FIP Model Code 90 Clauses on Anchorage and Transverse Tensile Actions in the Anchorage Zone of Prestressed Concrete Members*; 28<sup>th</sup> CEB Plenary Session; pp. 71-94; Viena; Septiembre, 1991.
- E21193 Eurocódigo 2: *Proyecto de Estructuras de Hormigón. Parte 1-1: Reglas Generales y Reglas para Edificación*; AENOR; Madrid, 1993.
- E21395 Eurocódigo 2: *Proyecto de Estructuras de Hormigón. Parte 1-3: Reglas Generales elementos y Estructuras Prefabricados de Hormigón*; AENOR; Madrid, 1995.
- E21496 Eurocódigo 2: *Proyecto de Estructuras de Hormigón. Parte 1-4: Reglas generales. Hormigón de árido ligero de textura cerrada*; AENOR; 1996.
- EHE97 EHE *Borrador de la Instrucción de Hormigón Estructural*; Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento; 24 de junio, 1997.
- EHE98 EHE *Instrucción de Hormigón Estructural*; Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento; 2ª Reimpresión; Marzo, 1998.
- EVAN55 Evans, K.A.; Robinson, G.W.; *Bond Stresses in Prestressed Concrete from X-Ray Photographs*; Institution of Civil Engineers; Vol. 14: Part 1, pp. 212-235; Marzo, 1955.
- EVAN68 Evans, R.H.; Marathe, M.S.; *Microcracking and Stress-Strain Curves for Concrete in Tension*; Matériaux et Construction; No. 1, pp. 61-64; Enero-Febrero, 1968.
- FAUL58 Faulkes, K.A.; *A Study of Bond in Prestressed Concrete Beams*; Maste of Engineering, School of Civil Engineering, N.S.W. University of Technology; Enero, 1958.
- FHWA85 Federal Highway Administration; *Criteria for Designing Lightweight Concrete Bridges*; U.S. Department of Transportation; 1985.
- FHWA94 Federal Highway Administration; *An Analysis of Transfer and Development Lengths for Pretensioned Concrete Structures*; U.S. Department of Transportation; RD-94-049; Diciembre, 1994.
- FOUR85a Fouré, B.; *Résistance Potentielle a Long Terme du Béton Soumis a une Contrainte Soutenue*; Béton; No. 431, pp. 47-63; Enero, 1985.
- FOUR85b Fouré, B.; *Étude Expérimentale de la Résistance du Béton sous Contrainte Soutenue*; Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics; No. 435, pp. 3-22; Série: Béton 229; Junio, 1985.

- FUJI72 Fujii, M.; Araki, T.; *Anchorage Zone Stresses in Pre-Tensioned Prestressed Concrete Members*; Memoirs of the Faculty of Engineering; No. 18, pp. 55-63; Kobe University; 1972.
- GREE84 Green, J.K.; Cookson, P.J.; Johnson, K.A.L.; *The Performance of Pretensioned Concrete Beams that have Cracked before Transfer of Prestress*; The Structural Engineering; Vol. 62B, No. 4, pp. 79-85; Diciembre, 1984.
- GUYO53 Guyon, Y.; *Prestressed Concrete*; Contractors Record and Municipal Engineering; London; 1953.
- HANS59 Hanson, N.W.; Kaar, P.H.; *Flexural Bond Tests of Pretensioned Prestressed Beams*; Journal of the American Concrete Institute; Vol. 30, No. 7, pp. 783-802; ACI; Enero, 1959.
- HANS69 Hanson, N.W.; *Influence of Surface Roughness of Prestressing Strand on Bond Performance*; PCI Journal; pp. 33-45; Febrero, 1969.
- HOLM70 Holmberg, A.; Lindgren, S.; *Anchorage and Prestress Transmission*; The National Swedish Institute of Building Research; Document D1; 1970.
- HOYE39 Hoyer, E.; Friederich, E.; *Beitrag zur Frage der Haftspannung in Eisenbeton-bauteilen*; Beton und Eisen; Vol. 50, No. 9, pp. 717-736; Berlín; 1939.
- JANN54 Janney, J.R.; *Nature of Bond in Pre-Tensioned Prestressed Concrete*; Journal of the American Concrete Institute; Vol. 25, No. 9, pp. 717-736; ACI; Mayo, 1954.
- JANN63 Janney, J.R.; *Report of Stress Transfer Length Studies on 270 k Prestressing Strand*; PCI Journal; Febrero, 1963.
- JONE70 Jones, H.L.; Furr, H.L.; *Development Length of Strands in Prestressed Panel Subdecks*; Research Report 145-2; Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station, Texas; Diciembre, 1970.
- KAAR63 Kaar, P.H.; LaFraugh, R.W.; Mass, M.A.; *Influence of Concrete Strength on Strand Transfer Length*; Journal of Prestressed Concrete Institute; No. 8(5), pp. 47-67; 1963.
- KAAR65 Kaar, P.H.; Magura, D.D.; *Effects of Strand Blanketing on Performance of Pretensioned Girders*; Journal of Prestressed Concrete Institute; No. 10(6), pp. 20-34; 1965.
- KAAR75 Kaar, P.H.; Hanson, N.W.; *Bond Fatigue Test of Beams Simulating Pretensioned Concrete Crossties*; PCI Journal; Vol. 20, No. 5, pp. 65-80; Septiembre-Octubre, 1975.
- KANN97 Kannel, J.; French, C.; Stolarski, H.; *Release Methodology of Strands to Reduce End Cracking in Pretensioned Concrete Girders*; PCI Journal; Vol. 42, No. 1, pp. 42-54; Enero-Febrero, 1997.
- KORN80 Kornev, N.A.; Kramar, V.G.; Kudryavtsev, A.A.; *Design Peculiarities of Prestressed Supporting Constructions from Concretes on Porous Aggregates*; Proceedings of the Second International Congress on



- Lightweight Concrete, Concrete International; pp. 141-151; The Construction Press, Lancaster, England; 1980.
- LABO97 Laboratoires des Ponts et Chaussées; *Détermination de la Longueur Conventionnelle de Scellement des Armatures de Précontrainte par Adhérence*; Projet de Méthode d'Essais L PC No. XX; Rév 1; Ministère de l'Amenagement du Territoire de l'Equipement et des Transports, 3<sup>e</sup> projet; Abril, 1997.
- LANE90 Lane, S.N.; *Development Length of Prestressing Strand*; Public Roads; Vol. 54, No. 2, pp. 200-205; 1990.
- LANE92 Lane, S.N.; *Transfer Lengths in Rectangular Prestressed Concrete Concentric Specimens*; Public Roads; Vol. 56, No. 2, pp. 67-71; 1992.
- LU00 Lu, Z.; Boothby, T.E.; Bakis, C.E.; Nanni, A.; *Transfer and Development Lengths of FRP Prestressing Tendons*; PCI Journal; pp. 84-95; PCI; Marzo-Abril, 2000.
- LYDO80 Lydon, F.D.; Balendran, R.V.; *Some Properties of Higher Strength Lightweight Concrete under Short-Term Tensile Stress*; International Journal of Lightweight Concrete; Vol. 2, No. 3, pp. 125-138; 1980.
- MAHM99 Mahmoud, Z.I.; Rizkalla, S.H.; Zaghoul, E.-E.R.; *Transfer and Development Lengths of Carbon Fiber Reinforced Polimers Prestressing Reinforcement*; ACI Structural Journal; No. 96-S66, pp. 594-602; ACI; Julio-Agosto, 1999.
- MARS49 Marshall, G.; *End Anchorage and Bond Stress in Prestressed Concrete*; Magazine of Concrete Research; Vol. 1, pp. 123-127; London; Diciembre, 1949.
- MART93 Martínez Abella, F.; *Investigación Teórica y Experimental sobre el Comportamiento de Losas de Hormigón Pretensado con Armaduras Postesas no Adherentes*; Tesis Doctoral; 1993.
- MART98 Martínez, A.; Fernández Puentes, M.; *La Compactadora Descrita en la Norma EN 196-1 ¿Podrá Ayudarnos a Estimar la Docilidad de Morteros, y de Hormigones cuyo Tamaño Máximo es Menor de 12 mm?*; Fabricación, Investigación y Aplicaciones del Cemento y del Hormigón; No. 781, pp. 202-229; Febrero, 1998.
- MITC93 Mitchell, D.; Cook, W.D.; Khan, A.A.; Tham, T.; *Influence of High Strength Concrete on Transfer and Development Length of Pretensioned Strand*; PCI Journal; Vol. 38, No. 3, pp. 52-56; 1993.
- MURC93 Murcia Vela, J.; Aguado de Cea, A.; Marí Bernat, A.; *Hormigón Armado y Pretensado II*; Ediciones U.P.C.; Barcelona, 1993.
- NANN92 Nanni, A.; Tanigaki, M.; Hasuo, K.; *Bond Anchorage of Pretensioned FRP Tendon at Force Release*; Journal of Structural Engineering; Vol. 118, No. 10, pp. 2836-2854; ASCE; Octubre, 1992.
- OVER65 Over, R.S.; Au, T.; *Prestress Transfer Bond of Pretensioned Strands in Concrete*; Journal of the American Concrete Institute; Vol. 62, No. 11, pp. 1451-1460; ACI; Noviembre, 1965.

- PÁEZ89 Páez, A.; *El Hormigón Pretensado en Ingeniería y Arquitectura*; Librería Editorial Belisco, Madrid, 1989.
- PCI96a Moustafa Pull-Out Test Procedure; PCI, Precast/Prestressed Concrete Institute; Agosto, 1996.
- PCI96b Strand Bond Assurance, Urgent Action Required, Second Alert to All Producers Members; Second Alert Urgent Action Required; PCI, Illinois; 1996.
- PCID99 PCI Design Handbook; Precast and Prestressed Concrete; Precast/Prestressed Concrete Institute; 1999.
- RAIT81 Raithby, K.D.; Lydon, F.D.; *Lightweight Concrete in Highway Bridges*; The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete; Vol. 2, No. 3, pp. 133-146; Mayo, 1981.
- ROSE97 Rose, D.R.; Russell, B.W.; *Investigation of Standardized Tests to Measure the Bond Performance of Prestressing Strand*; PCI Journal; Vol. 42, No. 4, pp. 56-80; Julio-Agosto, 1997.
- RUSS97 Russell, B.W.; Burns, N.H.; *Measurement of Transfer Lengths on Pretensioned Concrete Elements*; Journal of Structural Engineering; Vol. 123, No. 5, pp. 541-549; Mayo, 1997.
- SARL84 Sarles, D.; Itani, R.Y.; *Effect End Blocks on Anchorage Zone Stresses in Prestressed Concrete Bridges*; PCI Journal; Vol. 29, No. 6, pp. 100-114; 1984.
- SHAH92 Shahawy, M.A.; Issa, M.; Batchelor, B.; *Strand Transfer Lengths in Full Scale AASHTO Prestressed Concrete Girders*; PCI Journal; Vol. 37, No. 3, pp. 84-96; PCI; Mayo-Junio, 1992.
- SHAR99 Sharaf Tork, B.; *Estudio de los Mecanismos Combinados de Fisuración y Adherencia en Elementos de Hormigón Armado y Pretensado*; Tesis Doctoral; Universidad Politécnica de Madrid; 1999.
- SWAM74 Swamy, R.N.; Anand, K.L.; *Transmission Length and Prestress Losses in High Strength Concrete*; Seventh International Congress of the Federation Internationale de le Precontrainte; Mayo-Junio, 1974.
- TABA93 Tabatabai, H.; Dickson, T.J.; *The History of the Prestressing Strand Development Length Equation*; PCI Journal; pp. 64-75; Noviembre-Diciembre, 1993.
- TANS80 Tanska, M.; *Lätt Balast i Betongkonstruktioner med hög Hållfasthet*; Nordisk Betong; No. 3, pp. 46-48; 1980.
- TILA77 Tilanterä, T.; Rechardt, T.; *Bond of Reinforcement in Lightweight Aggregate Concrete*; Vol. 17, pp. 2-35; Helsinki University of Technology, Division of Structural Engineering; 1977.
- TULI69 Tulin, L.G.; Al-Chalabi, M.M.; *Bond Strength as a Function of Strand Tension and Cement Paste Content for Lightweight Aggregate*; ACI Journal; pp. 840-846; ACI; Octubre, 1969.



- UNE82 UNE 7-436-82 *Método de Ensayo para la Determinación de las Características de Adherencia de las Armaduras de Pretensado*; IRANOR; Madrid, 1982.
- UNE97 UNE 36-094-97 *Alambres y Cordones de Acero para Armaduras de Hormigón Pretensado*; 1997.
- VALD97 Valdés López, M.; *Comportamiento durante Construcción y bajo Cargas Permanentes de Puentes Continuos Prefabricados de Hormigón*; Tesis Doctoral; A.19; Universidad Politécnica de Cataluña; Diciembre, 1997.
- WEER91 Weerasekera, I.R.; *Transfer and Flexural Bond in Pretensioned Prestressed Concrete*; Tesis Doctoral; UMI; Michigan, 1991.
- WEIG74 Weigler-Karl; *Hormigones Ligeros Armados: Fabricación, Propiedades, Aplicaciones*; Gustavo Gili, S.A; 1974.
- ZIA77 Zia, P.; Mostafa, T.; *Development Length of Prestressing Strands*; PCI Journal; Vol. 22; No. 5, pp. 54-65; Septiembre-Octubre, 1977.
- ZOBE98 Zobel, R.S.; Jirsa, J.O.; *Performance of Strand Repairs in Prestressed Concrete Bridges*; PCI Journal; Vol. 43, No. 1, pp. 72-89; Enero-Febrero, 1998.





## Anexo 1

# NOTACIÓN Y NOMENCLATURA

## 1. CARACTERÍSTICAS DEL PRETENSADO

	Acero de pretensado bobina 1973		
$A_p$	Área cordón (ensayo del fabricante)	142.04	mm <sup>2</sup>
$f_{pym}$	Límite elástico (ensayo del fabricante)	250.9	kN
$f_{p\text{ máx},m}$	Carga máxima (ensayo del fabricante)	267.3	kN
$E_p$	Módulo de deformación (ensayo del fabricante)	197900	MPa
$f_{pyk}$	Límite elástico garantizado	229	kN
$\rho_{1000}$	Coef. relajación a 1000 horas	2.5	al 70% carga máxima de rotura
$f_{p\text{ máx},k}$	Carga máxima garantizada	260	kN
$\phi$	Diámetro del cordón	15.2	mm

## 2. CRITERIO DE SIGNOS ADOPTADO

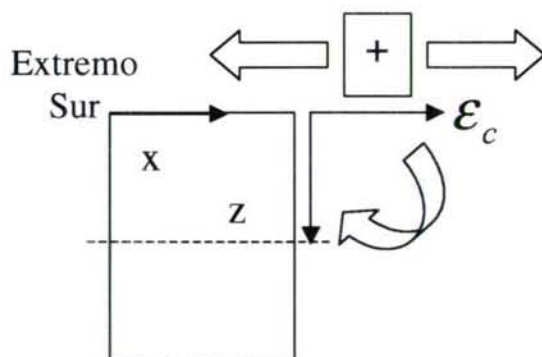


Figura A1.1-1



Fotografía A1.1-1

Curvatura de la viga: se determina en las secciones instrumentadas con tres bandas a diferentes alturas desde la cara superior: 75, 150 y 350 mm. Se efectúa la determinación del coeficiente  $R$ , para evaluar la planeidad de las deformaciones (positivas a tracción) de la sección (Figura A1.1-1, Fotografía A1.1-1).

3. CRITERIOS DE DENOMINACIÓN DE LOS ENSAYOS/RESULTADOS/PROPIEDADES

Propiedad	Tipo de material	Ensayo	Dosificación hormigón	Estadística	Ciclo módulo	Percentil	Probeta	Velocidad Carga	Edad (días)
$f$ = tensión	$C$ = hormigón	( $C$ = compresión)	$MAT$	$k$ = característico	$A$ = primer ciclo	0.05	$cub$ = cúbica	( $VN$ )	$j$
$E$ = módulo deformación	$P$ = pretensado	$ct$ = tracción directa	$HC$	$m$ = promedio	$B$ = segundo ciclo	0.95	$cil$ = cilíndrica 15x30	$VL$	2
$\rho$ = peso específico	$S$ = armadura pasiva	$ci$ = tracción indirecta	$HL$	$d$ = cálculo	$C$ = tercer ciclo		10x20 = cilíndrica 10x20		3
$\alpha$ = coeficiente de cansancio		$ct, fl$ = flexotracción	HL10-1	$est$ = estimada					28
$\varepsilon$ = deformación		$u$ = último/a	HL3-1	máx = máximo					
		$y$ = límite elástico	HL10-2	mín = mínimo					
		máx = carga máxima	HL3-2						

Variable	Superíndice referido a la variable	Material	Zona	Edad ensayo días	valor correspondiente a F.U.A. Máxima /mínima	Antes deslizamiento /después deslizamiento	Instantáneo /diferido
$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]$		$MAT$	LT,LC	$e (2,3)$	máx, mín	AD, DD	$DIF$
$\delta^{MAX}(t)$			LT,LC	$e (2,3)$	máx, mín	AD, DD	
$\delta^{MIN}(t)$			LT,LC	$e (2,3)$	máx, mín	AD, DD	
$l_{bpt}$	$EST$				máx, mín		
$l_{bpc}$					máx, mín		
$\tau_b^*$					máx, mín	AD, DD	$DIF$
$\tau_b$					máx, mín	AD, DD	$DIF$



Viga	Ordinal de posición en bancada, desde Sur, anclaje activo	Tipo de hormigón	Humedad inicial de la arlita	Dosificación de hormigón ligero
V	"i"	L = ligero	10 = HL10	-1 = dosificación inicial
		C = convencional		-2 = dosificación final

donde:

P	Prisma	3.4
V	Viga	3.4
C	Convencional	3.4
L	Ligero	3.4
10	Humedad partida arlita 10%	3.4
3	Humedad partida arlita 3%	3.4
-1	Dosificación inicial	3.4
-2	Segunda dosificación	3.4

#### 4. OTRAS NOTACIONES

Galga Hormigón Este 50 I 350 540:

Cara Este 50 cm aproximadamente desde extremo Sur  
350 mm desde cara superior, 540 mm desde extremo Sur

Galga Pretensado inferior 02 cordón 3 8120:

Segunda galga de la viga desde extremo Sur, cordón inferior 3, 8120 mm desde extremo Sur

## 5. NOTACIÓN Y NOMENCLATURA

Denominación	Significado	Apartado de la 1ª Referencia
-1	Dosificación inicial	3.4
-2	Segunda dosificación	3.4
3	Humedad partida arlita 3%	3.4
10	Humedad partida arlita 10%	3.4
A.A.	Extremo más próximo al anclaje activo	11.3.3
A.L.	Árido Ligero	3.2.1
A.P.	Extremo más próximo al anclaje pasivo	11.3.3
$abs(x_1 - x_2)$	Valor absoluto de la diferencia entre los resultados $x_1, x_2$	6.4
$abs(z)$	Valor absoluto de $z$	11.3.1
$A_c, I_c$	Características de la sección neta de hormigón	8.1
AN	Partida de áridos recibida en octubre de 1998, utilizada en el Lab. de Ing. de la Const. hasta enero del 2000	4.2.2
AN2	Partida de áridos recibida en octubre de 1998, partida utilizada en el Lab. de Ing. de la Const. a partir de enero del 2000	4.2.2
$A_p$	Área de la sección de pretensado	4.4
$A_{pi}$	Sección de pretensado inferior	9.2.5.2
$A_{ps}$	Sección de pretensado superior	9.2.5.2
$A_{sl}$	Sección de la armadura pasiva longitudinal a cortante	9.2.5.2
$A_{ss}$	Sección de la armadura pasiva superior	9.2.5.2
$A_t$	Armadura transversal a cortante (véanse Figura 9.2.5.2-1 y Fotografía 9.2.5.2-2)	9.2.5.2
AV	Partida de áridos recibida en junio de 1998, utilizada en el Lab. de Ing. de la Const. hasta octubre de 1998	4.2.2
$b$	Ancho de la sección transversal de la viga	9.2.5.2
C	Convencional	3.4
$c$	Recubrimiento, medido desde el c.d.g. del cordón de pretensado	11.2.3
c 6 a 10	Cercos de 6 mm a 10 cm a lo largo de los primeros 1.5 m desde cada extremo de la viga	10.2.2
c 6 a 15	Cercos de 6 mm a 15 cm a lo largo de los primeros 1.5 m desde cada extremo de la viga	10.2.2
c 8 a 15	Cercos de 8 mm a 15 cm a lo largo de los primeros 1.5 m desde cada extremo de la viga	10.2.2
c 8 a 20	Cercos de 8 mm a 20 cm a lo largo de los primeros 1.5 m desde cada extremo de la viga	10.2.2
CC	Células de carga huecas, colocadas en los anclajes pasivo y activo de la bancada, que permiten la determinación de la fuerza de pretensado hasta la transferencia	8.1
CN	"cemento nuevo", partida utilizada en el Lab. de Ing. de la Const. hasta el 4 de noviembre de 1999	4.2.1
CN1	"cemento nuevo 1", partida utilizada en el Lab. de Ing. de la Const. hasta el 5 de enero de 2000	4.2.1
CN2	"cemento nuevo 2", partida utilizada en el Lab. de Ing. de la Const. a partir del 5 de enero de 2000	4.2.1
coeficiente $R$	El coeficiente del momento de correlación del producto Pearson de una serie "y" respecto a una serie "x"	3.3



coeficiente $R^2$	El cuadrado del coeficiente del momento de correlación del producto Pearson de una serie "y" respecto a una serie "x"	3.3
CV	"Cemento viejo", partida utilizada en el Lab. de Ing. de la Const. hasta el 16 de noviembre de 1998	4.2.1
D	Deslizamiento generalizado	10.4.6.2
DD	Deslizamiento dudoso	10.4.6.2
DIF	Valor correspondiente a un ensayo diferido, en el que se mantiene la diferencia de carga alcanzada al final del ensayo durante días o semanas	6.1
$d_{pi}$	Canto útil pretensado inferior	9.2.5.2
$d_{ps}$	Distancia desde c.d.g. $A_{ps}$ a paramento superior	9.2.5.2
$d_{ss}$	Distancia desde c.d.g. $A_{ss}$ a paramento superior	9.2.5.2
DU	Rotura dudosa, se produce cuando se desconoce la variación de deformación máxima en la zona central (vigas HL10-1)	10.4.6.2
DUD.	Ajuste dudoso	11.3.2.2
$e$	Edad de ensayo en días (2, 3)	6.1
E	Cara Este del prisma o viga	8.1
$e$	Excentricidad media del pretensado respecto al c.d.g. de la sección neta	8.1
$E_c(j)$	Módulo de deformación secante del hormigón a la edad de transferencia	10.4.1
$E_{cm,j}$	Módulo de deformación secante medio del hormigón a la edad de transferencia $j$	8.1
$e_{eq}(j)$	Excentricidad equivalente del pretensado a la edad de transferencia $j$	10.3.5
$EF (prop, MAT)$	Coefficiente de eficacia	4.1
EL	Elemento	11.3.3
$E_p^*$	Módulo de deformación longitudinal correspondiente a los alambres exteriores del cordón de pretensado, valor promedio	4.4
$E_p$	Módulo de deformación longitudinal del pretensado, valor promedio	4.4
ERR.CUAD.	Error cuadrático medio, multiplicado por $10^7$	8.3.1
EST	Superíndice que indica el valor estimado a partir de los ensayos	6.1
EXP.	Ajuste exponencial	11.3.2.2
$f_{CL}^*(j)$	Contraflecha teórica a la edad de transferencia	10.3.5
$f_{CL}(j)$	Contraflecha real a la edad de transferencia	10.3.5
$f_{cm,e}$	Resistencia a compresión probeta normalizada a la edad de ensayo (MPa) a la edad de ensayo $e$	6.2.2.1
$f_{cm,j}$	Resistencia a compresión de probeta cilíndrica $\phi 15 \times 30$ cm, determinada a la edad de ensayo $j$	6.2.3
$f_{ct,MAT,j}$	Resistencia a tracción del material, a la edad de transferencia, $j$ días	11.2.3
$f_{ctm,e}$	Resistencia a tracción directa a la edad de ensayo (MPa) a la edad de ensayo $e$	6.2.2.1
$f_{ctm,j}$	Resistencia a tracción directa determinada a la edad de ensayo $j$	6.2.3
$f_{HC1,2}$	Resistencia a tracción directa del hormigón convencional, a la edad de transferencia habitual de 2 días	8.5.2
$f_{HL,j}$	Resistencia a tracción directa del hormigón ligero a la edad de transferencia	8.5.2
$f_{pmáx,k}$	Carga unitaria de rotura del pretensado, valor característico	4.4

$f_{pm\acute{a}x,m}$	Carga unitaria de rotura del pretensado, promedio	4.4
$f_{py}$	Límite elástico del pretensado	10.4.6.2
$f_{pyk}$	Límite elástico al 0.2% garantizado del pretensado	4.4
$f_{pyk,0.1}$	Límite elástico al 0.1% del pretensado, valor característico	4.4
$f_{pym}$	Límite elástico al 0.2%, valor promedio	4.4
$f_{pym,0.1}$	Límite elástico al 0.1%, valor promedio	4.4
Galga armadura confinamiento	Bandas extensométricas situadas longitudinalmente en la armadura transversal de confinamiento	10.1
Galga armadura cortante	Bandas extensométricas situadas longitudinalmente en la armadura transversal a cortante	10.1
GC	Bandas extensométricas adheridas al pretensado, previamente a la fabricación de los prismas/vigas, que denominaremos galgas de cable	8.1
GH	Bandas extensométricas adheridas a los paramentos de los prismas/vigas tras su desencofrado, colocadas paralelamente al eje longitudinal, a la altura del pretensado, en ambas caras laterales	8.1
$h$	Canto total de la sección	9.2.3
HC	Hormigón convencional de referencia	3.2.1
HL	Hormigón ligero, en general	3.2.1
HL10-1	Dosificación de hormigón ligero en peso, arcilla expandida con humedad del 10%, cono de Abrams a los 15 minutos de 6 cm, resistencia a compresión a 48 horas a VN en probeta cilíndrica mayor que 45 MPa	4.3.1
HL10-2	Dosificación modificada de hormigón ligero en peso, arcilla expandida con humedad del 10%, trabajabilidad equivalente a la del HC a los 15 minutos del final de amasado	4.3.2
HL3-1	Dosificación de hormigón ligero en peso, arcilla expandida con humedad del 3%, cono de Abrams a los 15 minutos de 6 cm, resistencia a compresión a 48 horas a VN en probeta cilíndrica mayor que 45 MPa	4.3.1
HL3-2	Dosificación modificada de hormigón ligero en peso, arcilla expandida con humedad del 3%, trabajabilidad equivalente a la del HC a los 15 minutos del final de amasado	4.3.2
INF	Subíndice que indica un valor correspondiente a la parte inferior de la probeta	6.1
INF	Cara Inferior del prisma o viga	8.1
$j$	Edad de transferencia o ensayo (días)	4.1
$K$	Constante que depende principalmente de la forma de la sección, del diámetro del cordón de pretensado y del módulo de Poisson del acero	11.2.3
$K^*$	Coefficiente dimensional ( $l^{-1}$ ) proporcional al coeficiente $k$ , que depende además del recubrimiento de la sección, del alcance de la zona fisurada, ...	11.2.3
L	Ligero	3.4
$L$	Longitud total de la viga	9.2.3
$l_0$	Luz de la viga entre ejes de apoyos	9.2.3
$L_a$	Distancia desde el extremo de la viga al c.d.g. del apoyo más próximo	9.2.3
$l_{bpc}(t)$	Longitud complementaria a tracción, correspondiente a una tensión del límite elástico garantizado del pretensado a la edad $t$	6.1
$l_{bpc,m\acute{a}x}(t)$	Predicción de la longitud complementaria a tracción máxima, a la edad $t$ (días)	11.2.2.1



$l_{bpc,min}(t)$	Predicción de la longitud complementaria a tracción mínima, a la edad $t$ (días)	11.2.2.2
$l_{bpd}(t)$	Longitud de anclaje correspondiente a una tensión del límite elástico garantizado del pretensado a la edad $t$	6.1
$l_{bpd,HL}$	Longitud de anclaje estimada para las vigas de hormigón ligero	9.2.3
$l_{bpt}(t)$	Longitud de transmisión del pretensado a la edad $t$	6.1
$L_{bpt,EL,MAT,EXT}(t)$	Longitud de transmisión, medida en un Elemento de un determinado MATerial, en un EXTremo determinado, transcurrido un cierto tiempo "t" desde la transferencia, método lineal	11.3.3
$l_{bpt,máx}$	Longitud de transmisión estimada máxima	6.2.3
$l_{bpt,máx}(j)$	Cota superior estimada para la longitud de transmisión, inmediatamente tras la transferencia	11.2.1.1
$l_{bpt,min}$	Longitud de transmisión estimada mínima	6.2.3
$l_{bpt,min}(j)$	Cota inferior estimada para la longitud de transmisión, inmediatamente tras la transferencia	11.2.1.2
LC	Ensayo de pórtico LC, o ensayo de adherencia en probeta para la simulación de la zona complementaria a tracción	3.4
$l_e$	Longitud desde extremos a la carga puntual aplicada más próxima	9.2.5.2
$LIN.$	Ajuste lineal	11.3.2.2
$l_p$	Longitud de desarrollo de las cargas puntuales aplicadas	9.2.3
$L_{prisma}$	Longitud total del prisma	8.3.7
$l_s$	Distancia desde extremos a armadura suspensión $A_{sur}$	9.2.5.2
LT	Ensayo de pórtico LT, o ensayo de adherencia en probeta para la simulación de la zona de transmisión	3.4
$L_{r1}$	Longitud de transmisión en el extremo Sur	8.3.1
$L_{r2}$	Longitudes de transmisión en el extremo Norte	8.3.1
$M$	Deformación total en la zona central de adherencia perfecta: incluye deformación tensional y deformación diferida por retracción y fluencia	8.3.1
$m_1, m_2$	Deformación por retracción a la edad de medida, en los extremos 1 y 2 del elemento considerado	8.3.1
$MAT$	Material ensayado (HC, HL3-1, HL10-1, HL10-2)	4.1
$MÁX$	Superíndice que indica la cota superior del deslizamiento	6.1
$M_f$	Momento flector de fisuración	10.6.1
$MÍN$	Superíndice que indica la cota inferior del deslizamiento	6.1
$M_{máx}$	Momento flector máximo a lo largo de la viga durante el ensayo	10.1
$M_{plas}$	Momento flector de plastificación estimado	10.6.1
$M_{pp}$	Momento flector producido por el peso propio movilizado durante la transferencia	8.1
$M_{pp}(x,t)$	Momento flector introducido por el peso propio	10.4.1
$n = \frac{E_p}{E_{cm,j}}$	Coefficiente de equivalencia de un determinado hormigón a la edad $j$	8.1
N	Cara Norte del prisma o viga	8.1
ND	Ausencia de deslizamiento generalizado	10.4.6.2
Norte (N)	Anclaje pasivo de la bancada de pretensado	10.1
$n_t$	Número total de puntos de medida a lo largo del elemento	8.3.1

OUTEIRO	Material procedente de los acopios de material de la fábrica de Outeiro de Rei, empleado en la fabricación de cada serie: julio de 1999 y febrero de 2000	4.2.1
P	Prisma	3.4
$p$ (MAT)	Densidad de equilibrio de un determinado material	4.1
$P(t)$	Fuerza de pretensado transferida a la zona central de la viga a la edad de evaluación $t$ . Este valor se obtiene descontando a la fuerza de pretensado tras pérdidas instantáneas, $P_3$ , las pérdidas diferidas que se hayan producido hasta el instante $t$	6.1
$P(x, t)$	Fuerza de pretensado en la sección a $x$ metros del apoyo, a la edad $t$	10.4.1
$P_0$	Tracción inicial del cordón de pretensado en los ensayos de pórtico LT, correspondiente a la máxima tensión de tesado del cordón de pretensado admitida por la EHe de forma permanente	5.3
$P_2$	Fuerza de pretensado total, inmediatamente antes de la transferencia de pretensado	8.1
$P_{2,teo}$	Fuerza de pretensado teórica inmediatamente antes de la transferencia	11.3.1
$P_3$	Fuerza de pretensado total, inmediatamente después de la transferencia de pretensado, en la zona central del elemento	8.1
$P_b$	Tracción del pretensado en la parte superior de la probeta, en un ensayo LT o LC	5.3.1
$P_b(t_0)$	Carga inferior inicio ensayo $P(t)$ (kN)	6.3.2.1
$P(\epsilon_p^*)$	Fuerza de pretensado estimada a partir de la deformación del pretensado	10.2.3
$P_i$	Pretensado inicial provisional de las vigas, para replantear y adherir las galgas extensométricas.	10.2.3
$P_i(j)$	Fuerza de pretensado inferior a la edad de transferencia $j$	10.3.5
$P_{inf}$	Fuerza de pretensado inferior	10.5
$P_{n,inf}$	Fuerza de neutralización estimada inferior	10.5
$P_{n,sup}$	Fuerza de neutralización estimada superior	10.5
$P_{n,total}$	Fuerza de neutralización estimada total	10.5
PR	Prisma	11.3.3
<i>promedio</i> ( $L_{bpt,PR,HC,EXT}(j)$ )	Valor promedio de la longitud de transmisión en las caras Este y Oeste, a la edad de transferencia, de los prismas de hormigón convencional, método lineal	11.3.3
<i>promedio</i> ( $x_1, x_2$ )	Media aritmética de $x_1, x_2$	6.4
<i>prop</i> (MAT, $j$ )	Propiedad de un determinado material, a la edad $j$	4.1
$P_s(j)$	Fuerza de pretensado superior a la edad de transferencia $j$	10.3.5
$P_{sup}$	Fuerza de pretensado superior	10.5
$P_t$	Tracción del pretensado en la parte superior de la probeta, en un ensayo LT o LC	5.3.1
$P_t(t_0)$	Carga superior inicio ensayo $P(t)$ (kN)	6.2.2.1
$P_{total}(j)$	Fuerza de pretensado total a la edad de transferencia $j$	10.3.5
$q$	Peso propio total de la viga	10.3.5
$r$	Radio interior, a partir del cual el hormigón no está fisurado por tensiones circunferenciales	11.2.3
$R^2Lt1$	Coefficiente $R^2$ del ajuste considerado, en el extremo 1	8.3.1
$R^2Lt2$	Coefficiente $R^2$ del ajuste considerado, en el extremo 2	8.3.1



RD	Rotura dúctil	10.4.6.2
$rec(x_1, x_2)$	Recorrido relativo de los valores $x_1, x_2$ , en %	6.4
RF	Rotura frágil	10.4.6.2
S	Cara Sur del prisma o viga	8.1
SUP	Subíndice que indica un valor correspondiente a la parte superior de la probeta	6.1
SUP	Cara Superior del prisma o viga	8.1
Sur (S)	Anclaje activo de la bancada de pretensado	10.1
$t$	Edad genérica tras la transferencia	11.3.3
Tangente FI	$\tan\varphi = \frac{\text{flecha}_{ct}}{l_e - l_e}$ parámetro aproximado de ductilidad, cociente entre la máxima flecha en centro luz y la distancia del apoyo a la carga aplicada más cercana	10.5.1
$u$	tensión de adherencia media en los ensayos de pórtico LT y LC	5.3.1
ue	Microdeformación = $10^{-6}$	4.3.5.1
V	Viga	3.4
$VAR_{P_3}(\%)$	Variación entre el valor experimental y la predicción de la fuerza de pretensado $P_3$ tras pérdidas instantáneas	11.3.1
VI	Viga	11.3.3
VL	Velocidad de aplicación de la carga lenta, en los ensayos realizados con control de carga	4.1
(VN)	Velocidad normalizada de aplicación de la carga, en los ensayos realizados con control de carga	4.1
$VR(L_{bpt,EL,MAT,EXT}(t))$	Valor relativo de la longitud de transmisión media entre ambas caras de un material a la edad "t", en un determinado extremo, tomando como referencia al hormigón convencional, método lineal	11.3.3
VS	"versus" (vs.), respecto a	4.3.5.3
W	Cara Oeste del prisma o viga	8.1
$x$	Distancia desde extremo Sur de la viga a la sección transversal considerada	10.1
$x_1, x_2$	Resultados experimentales	6.4
$x_i$	Distancia desde el extremo Sur al punto medio de la zona donde se mide la deformación	11.3.2.3
$\alpha_{ct}$	Coefficiente de cansancio del hormigón a tracción	9.2.1
$\alpha_{HCl,2}$	Coefficiente de cansancio a tracción del hormigón convencional, para cargas aplicadas a la edad de transferencia habitual de 2 días	8.5.2
$\alpha_{HLI,j}$	Coefficiente de cansancio a tracción del hormigón ligero, para cargas aplicadas a la edad de transferencia de pretensado de $j$ días	8.5.2
$\alpha_{t,MAT,j}$	Coefficiente de cansancio a tracción del material, para cargas permanentes aplicadas a la edad de transferencia	11.2.3
$\delta^{MAX}(t)$	Cota superior del deslizamiento generalizado en la probeta	6.1
$\delta^{MIN}(t)$	Cota inferior del deslizamiento generalizado en la probeta	6.1
$\delta_{MAT,LT,e,max}^{MAX}$	Deslizamiento inferior máximo para fuerza unitaria de adherencia máxima alcanzada durante el ensayo de pórtico LT (kN)	6.2.2.1
$\delta_{MAT,LT,e,max}^{MIN}$	Deslizamiento inferior mínimo para fuerza unitaria de adherencia máxima alcanzada durante el ensayo de pórtico LT (kN)	6.2.2.1
$\delta_{MAT,LT,e,max,AD}^{MAX}$	Deslizamiento inferior máximo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento inferior en el ensayo de pórtico LT (kN/m)	6.2.2.1

$\delta_{MAT,LT,e,m\acute{a}x,AD}^{MIN}$	Deslizamiento inferior mínimo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento inferior en el ensayo de pórtico LT (kN/m)	6.2.2.1
$\delta_{MAT,LC,e,m\acute{a}x}^{MAX}$	Deslizamiento superior máximo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento superior (mm) en el ensayo de pórtico LC	6.3.2.1
$\delta_{MAT,LC,e,m\acute{a}x}^{MIN}$	Deslizamiento superior mínimo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima durante inicio deslizamiento superior (mm) en el ensayo de pórtico LC	6.3.2.1
$\delta_{MAT,LC,e,m\acute{a}x,AD}^{MAX}$	Deslizamiento superior máximo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima antes del deslizamiento generalizado (mm) en el ensayo de pórtico LC	6.3.2.1
$\delta_{MAT,LC,e,m\acute{a}x,AD}^{MIN}$	Deslizamiento superior mínimo correspondiente a fuerza unitaria de adherencia máxima antes del deslizamiento generalizado (mm) en el ensayo de pórtico LC	6.3.2.1
$\Delta\epsilon_{p,m\acute{a}x}^*$	Variación de deformación máxima registrada en la galgas adheridas al alambre exterior del cordón de pretensado inferior, en la zona central de la viga	10.5.1.1
$\Delta\epsilon_{p,nec}^*$	Variación de deformación del alambre necesaria, estimada en la zona central, para el pretensado alcance el límite elástico	10.5
$\Delta P_3$	Pérdidas de pretensado debidas al acortamiento elástico, estimadas a partir de los valores experimentales de $P_2$ y de $P_3$	11.3.1
$\Delta P_{3,teo}$	Pérdidas de pretensado debidas al acortamiento elástico, estimadas a partir del valor de $P_2$ y del valor del módulo de deformación secante experimental a la edad de transferencia, $E_{cmj}$	11.3.1
$\Delta P_b$	Variación de tracción del pretensado en la parte superior de la probeta, en un ensayo LT o LC	5.3.2
$\Delta P_t$	Variación de tracción del pretensado en la parte superior de la probeta, en un ensayo LT o LC	5.3.1
$\Delta\sigma_{p,rel}(i-1,i)$	Pérdidas por relajación del pretensado entre $t_{i-1}$ y $t_i$	10.5.3
$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]$	Fuerza unitaria adherente (F.U.A.)	6.1
$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LC,t}$	F.U.A. de pretensado a lo largo de la probeta en el ensayo LT, en la zona complementaria a tracción a la edad $t$	6.1
$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,t}$	F.U.A. de pretensado a lo largo de la probeta en el ensayo LT, en la zona de transmisión a la edad $t$	6.1
$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,m\acute{a}x,e,AD}$	Fuerza unitaria de adherencia máxima probeta en el ensayo LT, previa al deslizamiento generalizado	6.2
$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,min,e,DD}$	Valor mínimo de la F.U.A. tras el deslizamiento generalizado probeta en el ensayo LT	6.2
$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,m\acute{a}x,e}$	F.U.A. máxima durante el ensayo probeta en el ensayo LT	6.2
$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LT,min,e,DD,DIF}$	Valor mínimo de la F.U.A. tras el deslizamiento generalizado probeta en el ensayo LT, valor diferido (tras la finalización del ensayo propiamente dicho).	6.2
$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LC,e,m\acute{a}x,AD}$	Fuerza unitaria de adherencia máxima, previa al deslizamiento generalizado en el ensayo de pórtico LC	6.6.6
$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LC,e,min,DD}$	Valor mínimo de la F.U.A. tras el deslizamiento generalizado en el ensayo de pórtico LC	6.3.3
$\left[\frac{\Delta P}{\Delta x}\right]_{MAT,LC,e,m\acute{a}x}$	F.U.A. máxima durante el ensayo en el ensayo de pórtico LC	6.3.3



$\left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right]_{MAT,LC,e,min,DD,DIF}$	Valor mínimo de la F.U.A. tras el deslizamiento generalizado, valor diferido (tras la finalización del ensayo propiamente dicho) en el ensayo de pórtico LC	6.3.3
$\frac{\Delta P(t)}{\Delta x} \Big _{MAT,LT,t}$	Fuerza unitaria adherente (F.U.A.) en la zona de transmisión a la edad $t$	11.2
$\frac{\Delta P(t)}{\Delta x} \Big _{MAT,LC,t}$	Fuerza unitaria adherente (F.U.A.) a lo largo de la longitud complementaria a tracción, a la edad $t$	11.2
$\frac{\Delta P}{\Delta x} \Big _{MAT,LT,j,max,AD}$	El máximo valor de la F.U.A. de la probeta antes de producirse el deslizamiento generalizado, a la edad de transferencia, $j$	11.2.1
$\frac{\Delta P}{\Delta x} \Big _{MAT,LT,j,max,j}$	Valor máximo de la F.U.A. en el ensayo LT, antes de haberse producido el deslizamiento generalizado del pretensado a lo largo de la probeta. Este valor, en todos los ensayos realizados, es el máximo valor de la F.U.A. en todo el ensayo	11.2.1
$\frac{\Delta P}{\Delta x} \Big _{MAT,LT,j,min,DD}$	Valor mínimo de la F.U.A. en el ensayo LT, tras haberse producido el deslizamiento generalizado, hasta la finalización del ensayo	11.2.1
$\frac{\Delta P}{\Delta x} \Big _{MAT,LT,j,min,DD,DIF}$	Valor mínimo de la F.U.A. en el ensayo LT diferido, tras haberse producido el deslizamiento generalizado, hasta que se desmonte el ensayo	11.2.1
$\frac{\Delta P}{\Delta x} \Big _{MAT,LC,j,max,AD}$	Valor máximo de la F.U.A. en el ensayo LC, antes de haberse producido el deslizamiento generalizado del pretensado a lo largo de la probeta. Este valor, en todos los ensayos realizados, es el máximo valor de la F.U.A. en todo el ensayo	11.2.2
$\frac{\Delta P}{\Delta x} \Big _{MAT,LC,j,min,DD}$	Valor mínimo de la F.U.A. en el ensayo LC, tras haberse producido el deslizamiento generalizado, hasta la finalización del ensayo	11.2.2
$\frac{\Delta P}{\Delta x} \Big _{MAT,LC,j,min,DD,DIF}$	Valor mínimo de la F.U.A. en el ensayo LC, tras haberse producido el deslizamiento generalizado, hasta que se desmonte el ensayo	11.2.2
$\frac{\Delta P}{\Delta x} \Big _{MAT,LT,j,max}$	F.U.A. máxima en la zona de transmisión. Adoptamos el valor máximo previo al deslizamiento	11.2.3
$\varepsilon_c(x)$	Valor de la deformación a partir de las medidas experimentales	8.3.1
$\bar{\varepsilon}_c(x)$	Estimación de la deformación del modelo empleado	8.3.1
$\varepsilon_c(x_i)$	Valor de la medida experimental de la deformación en el punto $x_i$ , $i = 1, 2 \dots n_f$	11.3.2.3
$\bar{\varepsilon}_c(x_i)$	Valor de la estimación de la deformación en la sección $x_i$	11.3.2.3
$\varepsilon_c(x, y, j)$	Deformación total del hormigón a la edad $t_0$ , en la sección $x$ , en la fibra $y$	10.4.1
$\varepsilon_{c,p}(x, y, j)$	Deformación del hormigón debida al pretensado a la edad de transferencia $j$ (positiva a tracción)	10.4.1
$\varepsilon_{c,pp}(x, y, j)$	Deformación del hormigón debida al peso propio a la edad de transferencia $j$ (positiva a tracción)	10.4.1
$\varepsilon_p$	Deformación longitudinal del cordón de pretensado (ue)	4.4
$\varepsilon_p^*$	Deformación longitudinal correspondiente a los alambres exteriores del cordón de pretensado, valor que se mide experimentalmente mediante las galgas de cable (ue)	4.4
$\varepsilon_p^*(P_i)$	Deformación del alambre del cordón de pretensado correspondiente a la fuerza de pretensado $P_i$	10.2.3
$\varepsilon_p^*(P_2)$	Deformación del alambre del cordón de pretensado correspondiente a la fuerza de pretensado $P_2$	10.2.3
$\varepsilon_p^*(x, t)$	Deformación total del cordón, medida para un alambre exterior, en la sección $x$ a la edad $t$	10.4.6.2

$\epsilon_{pm\acute{a}x,m}$	Alargamiento del pretensado bajo carga máxima, valor promedio	4.4
$\epsilon_{pu}$	Alargamiento bajo carga máxima garantizada del pretensado ( $l \geq 500mm$ )	4.4
$\nu_{HC}$	Módulo de Poisson del HC	8.5.2
$\nu_{HL}$	Módulo de Poisson del HL	8.5.2
$\nu_{MAT}$	Módulo de Poisson del material	11.2.3
$\nu_{HC}^{m\acute{a}x}$	Módulo de Poisson máximo del HC (FOUR85a, FOUR85b)	11.2.3
$\nu_{HL}^{med}$	Módulo de Poisson medio del HL (FOUR85a, FOUR85b)	11.2.3
$\rho_{1000}$	Coefficiente de relajación a 1000 horas al 70% de la carga de rotura garantizada	4.4
$\rho = \frac{A_p}{A_c}$	Cuánta geométrica de pretensado	8.1
$\rho(t)$	Porcentaje de pérdidas de relajación transcurridos $t$ días del tesado definitivo	10.5.3
$\sigma_c(v)$	Tensión en el hormigón, en la fibra superior, a la edad de transferencia	10.3.5
$\sigma_c(v')$	Tensión en el hormigón, en la fibra inferior, a la edad de transferencia	10.3.5
$\sigma_{cgp}$	Tensión originada en el hormigón, a la altura del c.d.g. del pretensado, al transferir	8.1
$\sigma_{c,m\acute{a}x}$	Tensión de compresión longitudinal máxima en la probeta (MPa) durante el ensayo	6.2.2.1
$\sigma_{c,tr,MAT}$	Tensión de tracción originada en la zona de transmisión de forma permanente	11.2.3
$\sigma_p(x,t)$	Tensión del pretensado, en la sección $x$ a la edad $t$	10.4.6.2
$\tau_b^*$	Tensión de adherencia estimada a partir del perímetro nominal del cordón de pretensado	6.1
$\tau_b$	Tensión de adherencia estimada a partir de un valor del perímetro del cordón igual a $\frac{4}{3}\pi d_b$ (FHWA94)	6.1



## *Anexo 2*

# **PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS DE ADHERENCIA EN PROBETA**

### **A2.1. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE SIMULACIÓN DE COMPORTAMIENTO ADHERENTE EN LA ZONA DE TRANSMISIÓN**

Si fijamos un día determinado, I, para el hormigonado de los pórticos, son necesarias unas operaciones previas y unas posteriores:

#### **1. DÍA I-5**

- 1.1. Cuarteado de los sacos de áridos para dos amasadas de 47 litros, con objeto de extraer muestras para la determinación de las humedades de los áridos.
- 1.2. Limpieza de los moldes de las probetas.
- 1.3. Vertido de desencofrante a moldes.
- 1.4. Engrasado de los triángulos y las roscas de los pórticos.
- 1.5. Confección de conectores de instrumentación.
- 1.6. Pegado de tetones (discos de extensometría) en clavitos, para probetas de retracción.

#### **2. DÍA I-2**

- 2.1. Determinación de las humedades de los áridos.
- 2.2. Preparación de los sacos correspondientes a las amasadas 1 y 2, para un volumen de amasada de 47 litros.

#### **3. DÍA I-1**

- 3.1. Limpieza del cable de pretensado con acetona. Se anotará el estado superficial del cable de pretensado (brillante, ligeramente oxidado, oxidado), y se contarán las manchas de óxido y su superficie media en una zona representativa del cable, por ejemplo de 20 cm de longitud. Estos datos se apuntarán en la libreta de tesado.
- 3.2. Mediante una cinta métrica, medición del cable de pretensado, de las longitudes intermedias del cable, y entre cuñas de cable (precisión de 1 mm). Apuntar en la libreta de tesado.
- 3.3. Medida de la carrera de las tuercas, (precisión de 0.5 mm) con calibre de profundidad.

- 3.4. Ajuste de altura de los triángulos a una carrera de tuerca de 30 mm. Comprobación de la nivelación de los triángulos en dos lados del triángulo.
- 3.5. Colocación del cable, y de las células de carga y de las cuñas de anclaje.
- 3.6. Colocación del LVDT grande.
- 3.7. Como protección adicional, y para facilitar el centrado, colocar el molde exterior de la probeta en el pórtico (base y lateral).
- 3.8. Precolocación del cable de pretensado. Se medirá la distancia del cable entre caras externas de los triángulos. Se apuntará en la libreta de tesado.
- 3.9. Pegado de galgas extensométricas en el cable de pretensado, en la parte superior. Se recubrirán con celofán. Se esperará al menos 8 horas antes del tesado del cable.
- 3.10. Colocación del LVDT grande y de la placa de referencia. Enchufado del mismo al canal correspondiente.
- 3.11. Inicialización del histórico de tesado de la viga, por ejemplo 9911tec.DAT, (1999, noviembre, tesado, Hormigón Convencional), con instrucciones de grabado cada 2 segundos.
- 3.12. Calentamiento del gato de pretensado durante 15 minutos, antes de tesar.
- 3.13. Engrase de los orificios de paso del cable de pretensado, para minimizar las pérdidas por rozamiento.
- 3.14. Nivelación de las placas triangulares de apoyo superior e inferior, para que durante el tesado el cable se mantenga perpendicular a las placas.
- 3.15. Si el ensayo es de simulación del comportamiento en servicio, se “calzará” la placa inferior con las piezas de nylon, según la Figura A2.1-1.

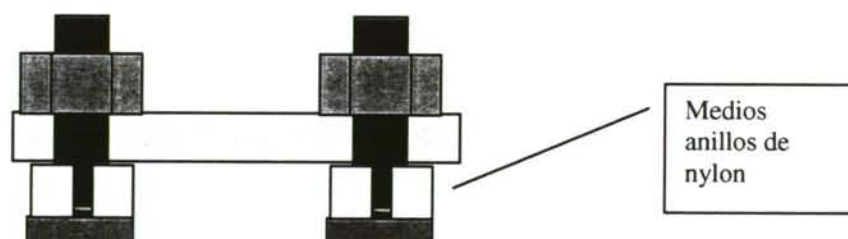


Figura A2.1-1

- 3.16. Se colocará en posición el molde de la probeta y se anclará a la placa, como medida adicional de seguridad.
- 3.17. Durante el tesado, nadie se acercará a menos de 2.5 metros del pórtico. La persona que esté tesando ha de permanecer agachado detrás de la central hidráulica durante el tesado, de forma que desde su posición no vea el cable de pretensado, y así el pórtico esté interpuesto entre él y el cable que se esté tesando.

Tabla A2.1-1

Célula de carga		CC63	CC64	CC65	CC66
kP vs puntos	kP	( $KP=10.197 \cdot CC$ 63+266.82)	( $KP=10.409 \cdot CC$ 64+265.09)	( $KP=10.216 \cdot CC$ 65+215.89)	( $KP=10.317 \cdot CC$ 66+260.01)
0.75 $f_{p\max}$	19899	1925	1886	1927	1904
0.85 $f_{p\max}$	22551	2185	2141	2186	2161
0.90 $f_{pyk}$	20296	1964	1924	1966	1942
0.95 $f_{pyk}$	21423	2075	2033	2076	2051



- 3.18. Tesado del cable hasta 50 bares. Se mantendrá durante 10 minutos, mientras se centra el cable de pretensado para que no roce. Con una brida de plástico se asegurará que el cordón no roza las paredes de los orificios.
- 3.19. Una vez que se compruebe que no roza en ningún agujero, y que el cable queda centrado respecto al molde de la probeta, se procederá al tesado según la Tabla A2.1-2. Tras la penetración de cuñas se recuperará carga hasta  $0.75 f_{pm\acute{a}x}$ , según la Tabla A2.1-1:

Tabla A2.1-2

	kp	CC 63	CC 64	CC 65	CC 66
Bares manómetro					
50	2561	225	221	230	223
100	5148	479	469	483	474
200	10322	986	966	989	975
300	15495	1493	1463	1496	1477
385	19892	1925	1885	1926	1903
400	20669	2001	1960	2003	1978
415	22200	2151	2107	2152	2127
Tras recuperar	19900	1925	1886	1927	1904
Antes amasado		(1927)	(1889)	(1930)	(1907)

- 3.20. Se medirá la distancia de los triángulos superior e inferior respecto a las placas hexagonales, con el calibre de profundidad y se anotarán los valores.
- 3.21. La instrumentación empleada se resume en la Tabla A2.1-3:

Tabla A2.1-3: Instrumentación

Canal	Posición	Medida
101		alimentación galgas
102	galga cable P1	galga 01
103	P1 superior	célula de carga 63
104	galga cable P2	galga 02
105	P1 inferior	célula de carga 64
106	G hormigón vertical	galga 03
107	P2 superior	célula de carga 65
108	G hormigón vertical	galga 04
109	P2 inferior	célula de carga 66
110	G hormigón vertical	galga 05
201	P1 inferior	transductor 48
202	G hormigón horizontal	galga 06
203		alimentación transductores
204	P1 superior	transductor 71
205	G hormigón horizontal	galga 07
206	P2 inferior	transductor 52
207	G hormigón horizontal	galga 08
208	P2 superior	transductor 72
209	flecha placa	transductor 50
210		salida prensa kN

## FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

Para cada una de las amasadas se fabricarán las siguientes probetas (Tabla A2.1-4):

Tabla A2.1-4

Tipo de molde	Nº moldes	Ensayo	Edad
Cúbico 10×10×10 cm	1	Compresión	Edad transferencia
Prismático 10×10×28.5 cm	1	Retracción Escuela	—
Cilíndrico 15×30 cm	1	Retracción Oural	—
Cilíndrico 15×30 cm	1	Abrishami	Edad transferencia
Cilíndrico 15×30 cm	2	Módulo deformación	Edad transferencia
Cilíndrico 15×30 cm	2	Brasileño	Edad transferencia
Tracción directa (ochos)	3	Tracción directa	Edad transferencia
Mortero 4×4×16 cm (3)	1	Mortero	28 días
Cúbico 10×10×10 cm	1	Compresión	28 días

- 3.22. Se ajustará el contenido de los sacos a un volumen de amasada de 45 litros. El material restante se pesará y se introducirá en la estufa para la comprobación de las humedades y la realización de granulometrías.
- 3.23. Se pesarán el agua y superfluidificante de cada amasada, y una persona distinta comprobará los pesos.
- 3.24. Se comprobarán los pesos de los sacos con una precisión de 1 gramo.
- 3.25. Se echará desencofrante en los moldes y el encofrado.
- 3.26. Durante la fabricación del hormigón, se tendrán en cuenta las siguientes restricciones:
- 3.27. Se seguirá el procedimiento de amasado establecido. Para las amasadas efectuadas en la amasadora de hormigón de eje vertical de la ETSICCP la secuencia de amasado es la que sigue (Tabla A2.1-5):

Tabla A2.1-5

Operación	Duración
Introducción de la arena	0
Mezclado de la arena	30s
Introducción del cemento	0
Amasado arena y cemento	60s
Limpieza de paredes laterales de la amasadora	20s
Introducción del árido grueso	0
Amasado conjunto arena + cemento + árido grueso	60s
Introducción del agua de amasado	0
Amasado conjunto arena + cemento + arlita + agua	60s
Vertido superfluidificante	0
Final del agua reservada	0
Amasado final	60s
Cono de Abrams inicial	0

- 3.28. Se limpiará el cordón de pretensado que quedará embebido en la probeta con acetona.
- 3.29. Se garantizará la estanquidad del molde colocando un cordón de silicona en la junta entre la base del molde y el cordón de pretensado.
- 3.30. Se limpiará cuidadosamente con acetona cualquier residuo de silicona de la zona que va a quedar embebida en el hormigón.
- 3.31. Se colocará el molde de la probeta lo más centrado posible. Se evaluará la excentricidad del cordón y se apuntará en la libreta de tesado.



- 3.32. Se tarará y colocará un vaso debajo de cada uno de los extremos inferiores del cable de pretensado de cada pórtico, para recoger el agua que escurre por el cordón de pretensado.
- 3.33. Se colocarán plásticos de protección encima de la placa del pórtico.
- 3.34. Se medirá el cono de Abrams al finalizar el amasado, y transcurridos 15 minutos desde el final de este.
- 3.35. Se efectuará el ensayo de golpes de Oural (MART98).
- 3.36. Se procederá al llenado de moldes, empezando por la probeta del pórtico.
- 3.37. Se vibrarán las probetas, aplicando un tiempo de vibrado de 6 segundos por litro de hormigón. Las probetas cilíndricas se llenarán en tres tongadas, hasta un centímetro por debajo del borde superior del molde. Se enrasará.
- 3.38. Tiempos de vibrado:
  - Probeta cúbica: 5 segundos
  - Probetas cilíndricas: 9+9+9 segundos
  - Probetas de pórtico: 6+6 segundos
- 3.39. Al final del proceso se anotará la hora de finalización de llenado de moldes en la libreta de amasados.
- 3.40. Se pesarán los sacos de áridos y cemento utilizados.
- 3.41. Se taparán con plásticos las probetas, al final del amasado. Transcurridas 3 ó 4 horas del final del amasado, se colocarán papeles mojados y plásticos cubriendo los moldes.
- 3.42. Se conservarán las probetas al lado del pórtico de amasado.
- 3.43. Al cabo de 24 horas del final del amasado, se desmoldarán las probetas, y se marcarán.
- 3.44. Se enviarán a Oural las probetas de retracción, los ochos y las de tamaño de 4×4×16 cm.
- 3.45. Se anotarán las horas de comienzo y final del hormigonado de la viga y de las probetas.
- 3.46. Al finalizar el llenado de moldes se colocarán clavos de medida de retracción en la probeta de retracción.

### CURADO DE LA VIGA

- 3.47. Transcurridas 4 horas del final de hormigonado se tomarán medidas iniciales de retracción y se colocarán papeles mojados encima de las probetas y viga, debajo de los plásticos.
- 3.48. Pesar vasitos y anotar peso, hora y día.

## 4. DÍA I+1

- 4.1. A la mañana se tomarán medidas de retracción en las probetas.
- 4.2. Pesar vasitos y anotar peso, hora y día.
- 4.3. Transcurridas 20 horas del hormigonado de las probetas, se retirarán los papeles y plásticos de curado, y se desmoldarán.
- 4.4. Se marcarán las probetas con fecha de amasado-material-pórtico.
- 4.5. Se limpiarán las probetas de pórtico y en las que se van a pegar galgas, con acetona, y se lijarán y se replantarán las galgas: en probeta del pórtico tres horizontales y tres verticales, y en dos probetas cilíndricas por amasada, dos galgas verticales y dos horizontales.

- 4.6. Se colocará la cinta de pintor, dejando 2.5 cm para la colocación de la base de PS. Se lijará y limpiará con acetona la parte superior de las probetas de pórtico, allí donde vayan a apoyar los transductores.
- 4.7. Después de 2 horas del desencofrado de la viga se colocarán las bases de PS, y se echará PS en la parte superior de cada probeta de pórtico, donde vayan a apoyar los transductores.
- 4.8. Transcurridas al menos 4 horas desde la colocación del PS, se pegarán las galgas de hormigón con PS.
- 4.9. Se comprobará la resistencia eléctrica de las galgas y la resistencia de las mismas con la base, y se anotarán los valores en la libreta de tesado.

## 5. DÍA I+2/I+3

- 5.1. Se medirán las probetas de retracción.
- 5.2. Se anotarán los valores de los canales activos.
- 5.3. Se soldarán las galgas del hormigón y se comprobarán canales.
- 5.4. Se colocarán los LVDT superiores e inferiores: los superiores extendidos y los inferiores apretados.
- 5.5. Se pegará papel de calca en la parte inferior de la placa, para comprobar el giro de los transductores inferiores durante el ensayo.
- 5.6. Se situará el transductor de medición de la flecha de la placa, lo más centrado posible respecto de la placa.
- 5.7. Se colocará la protección y se fijará a la placa mediante tornillos.
- 5.8. Se inicializará el histórico del corte de la viga, por ejemplo 9911TC1.DAT, (1999, noviembre, ensayo transmisión, Hormigón Convencional, pórtico 1), con instrucciones de grabado cada 2 segundos.
- 5.9. Se comprobará la frecuencia de grabación en el histórico: 2 segundos.
- 5.10. Se soltará gradualmente desde la parte del cable superior.
- 5.11. Durante el ensayo se inspeccionará la presencia de fisuras en las probetas, se marcarán las fisuras existentes y se anotará el criterio de signos y las incidencias en la libreta de ensayos.
- 5.12. Al final del ensayo se modificará la frecuencia de grabación del histórico a 150 segundos.
- 5.13. Se medirán las probetas de retracción.
- 5.14. No se desconectará el sistema de adquisición de datos hasta el tesado de la siguiente probeta.
- 5.15. Todos los días se anotarán las medidas de todos los canales, al inicio y al final de la jornada, y se compararán con las medidas anteriores, para detectar posibles irregularidades. Una vez por semana se enchufarán los canales de cada viga, para evaluar la deformación de las galgas del cable y del hormigón.
- 5.16. Se inspeccionarán los prismas periódicamente para la detección de las fisuras de todas las caras de la viga: se anotará el inicio y fin de fisura, abertura de las más características.



## ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN A LA EDAD DE ENSAYO

- 1) Se pesarán las probetas de caracterización del ensayo de la viga correspondiente.
- 2) El refrentado de las probetas tendrá lugar como mínimo 3 horas antes de su ensayo.
- 3) Se situarán las probetas cilíndricas en una superficie horizontal y limpia. La horizontalidad se comprobará con el nivel de aluminio.
- 4) Se replantearán en cada probeta cilíndrica 2 galgas verticales, a 2 cm a la derecha de cada "costura" de la probeta, con el centro exactamente a 15 cm de la base de la probeta.
- 5) Se replantearán en cada probeta cilíndrica 2 galgas horizontales centradas respecto a las anteriores, a exactamente 15 cm de la base de la probeta.
- 6) Se pegarán en cada probeta las 4 galgas de hormigón sobre una base de PS.
- 7) Se numerarán las galgas, de 1 a 3 las de la probeta cúbica y de 1 a 4 (1 y 2 las longitudinales y 3 y 4 las transversales) las de cada probeta.
- 8) Antes de proceder al soldado de las conexiones, se comprobará con la linterna que el grado de adhesión del conjunto hormigón/PS/galga es adecuado.
- 9) Se soldarán las conexiones.
- 10) Se ensayarán a compresión al menos 2 probetas cúbicas a velocidad normalizada, y se anotará la resistencia media,  $f_{cm,cub,j}$ , en MPa, y la forma de rotura de la probeta.
- 11) En caso de que se ensayen a compresión probetas cilíndricas, se tomará la media de los resultados de estos ensayos,  $f_{cm,cil,j}$ . En este caso, se determinará con los resultados de los apartados 10) y 11) el valor de  $F = \frac{f_{cm,cil,j}}{f_{cm,cub,j}}$ .
- 12) Si no se ensayasen probetas cilíndricas a compresión, se extrapolará la resistencia en probeta cilíndrica del resultado anterior y la experiencia previa con el mismo tipo de hormigón, de la siguiente forma:
  - Buscar en las libretas de rotura resultados de ensayos de probetas del mismo material y de la misma edad: probetas cúbicas y módulos de deformación en probeta cilíndrica normalizada 15×30 cm.
  - Calcular  $F = \frac{f_{cm,cil,j}^{REF}}{f_{cm,cub,j}^{REF}}$  del hormigón que estamos ensayando, valor que estará comprendido generalmente entre 0.75 y 0.90.
  - La resistencia de proyecto estimada (EST) de la amasada que estamos ensayando se calcula:  $f_{cm,cil,j}^{EST} = F \cdot f_{cm,cub,j}$ . Este valor, en MPa, se utilizará para el ensayo de módulo de deformación.
- 13) Se inicializará el histórico de la viga correspondiente 99-mes-viga, con frecuencia de grabación de 2 segundos.
- 14) Se comprobará que las galgas están conectadas correctamente en su canal.
- 15) Velocidades de ensayo según el tipo de probeta, según Tabla A2.1-6.
- 16) Cuando proceda, se ensayarán a compresión 2 probetas cúbicas a velocidad lenta, una de ellas con dos galgas pegadas longitudinalmente según la dirección de ensayo, en caras opuestas, sin hacer ciclos.

- 17) Los fragmentos de las probetas cúbicas se desmenuzarán y se pesarán, y se introducirán en estufa para poder determinar la densidad seca del hormigón ensayado.

Tabla A2.1-6

Velocidades según tipo de probetas			
Tipo de probeta	cub 10×10	cil 15×30	cil 10×20
Área (cm <sup>2</sup> )	100,000	176,715	78,540
Compresión normalizada (kN/s)	4,900	8,659	3,848
Compresión lenta (kN/s)	0,663	—	—
Brasileño (kN/s)	—	2,078	0,924
Módulos (kN/s)	2,410	4,258	1,892

- 18) Se ordenará y archivará la documentación generada durante el ensayo.
- 19) Los fragmentos de las probetas cúbicas se desmenuzarán y se pesarán, y se introducirán en estufa aquellos que no presenten adhesivo pegado para poder determinar la densidad seca del hormigón ensayado.
- 20) Se ordenará y archivará la documentación generada durante el ensayo.

## A2.2. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE SIMULACIÓN DE COMPORTAMIENTO ADHERENTE EN LA ZONA COMPLEMENTARIA A TRACCIÓN

El proceso seguido, hasta el tesado es similar, salvo en lo siguiente.

Una vez que se compruebe que el cordón no roza en ningún agujero, y que el cable queda centrado respecto al molde de la probeta, se procederá al tesado. Tras la penetración de cuñas se recuperará carga hasta lo estipulado por la Tabla A2.2-1:

Tabla A2.2-1

Bares	kp	CC 63	CC 64	CC 65	CC 66
50	2561	225	221	230	223
100	5148	479	469	483	474
200	10322	986	966	989	975
300	15495	1493	1463	1496	1477
385	19892	1925	1885	1926	1903
400	20669	2001	1960	2003	1978
415	22200	2151	2107	2152	2127
Tras recuperar	15785	1529	1498	1530	1512
Antes amasado		(1532)	(1501)	(1533)	(1515)



El proceso seguido coincide con el del apartado anterior, hasta:

## 5. DÍA I+3

- 5.1. Se medirá retracción en las probetas de retracción.
- 5.2. Se anotarán los valores de los canales activos.
- 5.3. Se soldarán las galgas del hormigón y se comprobarán canales.
- 5.4. Se colocarán los LVDT superiores e inferiores: los superiores extendidos y los inferiores apretados.
- 5.5. Se pegará papel de calca en la parte inferior de la placa, para comprobar el giro de los transductores inferiores.
- 5.6. Se situará el transductor de medición de la flecha de la placa, lo más centrado posible respecto de la placa.
- 5.7. Se fijarán colocará la protección y se fijará a la placa.
- 5.8. Se inicializará el histórico del corte de la viga, por ejemplo 9911AC1.DAT, (1999, noviembre, ensayo Anclaje, Hormigón Convencional, pórtico 1), con instrucciones de grabado cada 2 segundos.
- 5.9. Se comprobará la frecuencia de grabación en el histórico: 2 segundos.
- 5.10. Se tesará el cordón desde la parte inferior, hasta que se alcance la tensión correspondiente al límite elástico, o bien se alcance un deslizamiento generalizado.
- 5.11. Si se alcanza el límite elástico sin grandes deslizamientos, se dejará 48/72 horas más, para ver si en ese tiempo se produce deslizamiento generalizado/hendimiento de la probeta.
- 5.12. Transcurrido ese plazo si es el caso, se soltará desde la parte superior, hasta tensión nula, para evaluar la capacidad adherente residual.
- 5.13. Por último, se soltará la parte inferior del cable hasta tensión nula.
- 5.14. Al final del ensayo se modificará la frecuencia de grabación del histórico a 150 segundos.
- 5.15. Se medirán las probetas de retracción.
- 5.16. No se desconectará el sistema de adquisición de datos hasta el tesado de la siguiente probeta.





## *Anexo 3*

# **PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE LOS PRISMAS**

El proceso de fabricación de cada prisma se prolonga a lo largo de una semana, siendo necesarios dos técnicos especializados de laboratorio a tiempo completo. A continuación se describen las operaciones necesarias para completar el ciclo.

### **A3.1. TESADO Y FABRICACIÓN**

#### **1. DÍA I-5**

- 1.1. Cuarteado de los sacos de áridos para dos amasadas de 47 litros, con objeto de extraer muestras para la determinación de las humedades de los áridos.
- 1.2. Limpieza de los moldes de las probetas.
- 1.3. Vertido de desencofrante a moldes.
- 1.4. Engrasado de los triángulos y las roscas de los pórticos.
- 1.5. Confección de conectores de instrumentación.
- 1.6. Pegado de tetones (discos de extensometría) en clavitos, para probetas de retracción.

#### **2. DÍA I-2**

- 2.1. Determinación de las humedades de los áridos.
- 2.2. Preparación de los sacos correspondientes a las amasadas 1 y 2, para un volumen de amasada de 47 litros.

#### **3. DÍA I-1**

- 3.1. Limpieza del cable de pretensado con acetona. Se anotará el estado superficial del cable de pretensado (brillante, ligeramente oxidado, oxidado), y se contarán las manchas de óxido y su superficie media en una zona representativa del cable, por ejemplo de 20 cm de longitud. Estos datos se apuntarán en la libreta de tesado.
- 3.2. Ajuste de las distancias de las tuercas de ajuste de la carga del cable al triángulo de referencia, 5 cm para las tuercas móviles y 6.5 cm para la tuerca fija.
- 3.3. Precolocación del cable de pretensado. Se medirá la distancia del cable entre caras externas de los triángulos. Se apuntará en la libreta de tesado.

- 3.4. Pegado de galgas extensométricas en el cable de pretensado, con PS, en total 5, intentando que estén en distintos cordones. Se recubrirán con celofán. Se esperará al menos 8 horas antes del tesado del cable. Las distancias a la mitad del cable serán, en centímetros, mirando en dirección a las ventanas:

Galga de cable	GC1	GC2	GC3	GC4	GC5
Distancia a extremo Sur (mm)	1875	1475	2275	925	2825

- 3.5. Antes de colocar el gato de pretensado, se harán dos marcas en el cordón de pretensado, en la parte más extrema de las cuñas, con objeto de medir alargamiento de cable.
- 3.6. Colocación del transductor de desplazamiento y de la placa de referencia.
- 3.7. Calentamiento del gato de pretensado durante 15 minutos, antes de tesar.
- 3.8. Tesado del cable de pretensado hasta 50 bares. Comprobación y ajuste del centrado del gato respecto a la sección del encofrado de la viga, en centro luz. En caso de excentricidad se apuntará ésta en la libreta de tesado, así como su sentido.

Tabla A3.1-1

Lectura manómetro gato	Pretensado nominal aplicado
Bares	kN
50	25
100	50
200	101
300	152
385	195
400	203
415	210
Tras recuperar mediante sistema de tuercas	195

- 3.9. Tesado del cable hasta 210 kN (según el proceso de la Tabla A3.1-1). Clavado de cuñas.
- 3.10. Recuperación de la fuerza de tesado en el cable hasta 195 toneladas.
- 3.11. Marcado de la posición exacta de las galgas en el encofrado. Medir las distancias entre las galgas y la de centro viga.
- 3.12. Colocación de la protección de butilo de las galgas extensométricas.

#### 4. DÍA I (DÍA DE FABRICACIÓN DE LA VIGA)

- 4.1. Se medirá la distancia existente entre las galgas y la zona de invasión de cada una de ellas (donde se impide la adherencia del cable con el hormigón). Estos datos se apuntarán en la libreta de tesado.
- 4.2. Los cables de las galgas extensométricas del cable se colocarán en vertical y se sujetarán al molde.
- 4.3. Se ajustará la altura del encofrado con ayuda de los gatos de 2 toneladas, para garantizar que el cable está centrado en todas las secciones.
- 4.4. Se colocarán los costeros del molde, con ayuda de la plantilla.



### HORMIGONADO DE LA VIGA

- 4.5. Se ajustará el contenido de los sacos a un volumen de amasada de 45 litros. El material restante se pesará y se introducirá en la estufa para la comprobación de la humedad de los áridos.
- 4.6. Se pesarán el agua y superfluidificante de cada amasada, y una persona distinta comprobará los pesos.
- 4.7. Se comprobarán los pesos de los sacos con una precisión de 1 gramo.
- 4.8. Se aplicará desencofrante en los moldes y el encofrado. El esquema de las probetas y el prisma se presenta en la Tabla A3.1.2.
- 4.9. Se garantizará la estanqueidad del encofrado colocando un cordón de silicona en la junta entre los costeros del encofrado y la cara anterior y posterior del molde.
- 4.10. Se marcará en los costeros la altura de hormigonado.
- 4.11. Se fabricará la primera amasada. Se retirará el hormigón obtenido a una carretilla. Se determinarán golpes transcurridos 15 minutos desde éste.
- 4.12. Sin haber limpiado previamente la amasadora se procederá a fabricar la segunda amasada. Una vez finalizada ésta se determinarán golpes a los 15 minutos del fin de la segunda amasada.
- 4.13. Se mezclarán las dos amasadas durante 1 minuto en la amasadora, y se determinarán golpes a los cinco minutos del fin de la mezcla.
- 4.14. Se anotarán las horas de comienzo y final del hormigonado de la viga y de las probetas. Se vibrará una media de 5 segundos por litro de hormigón en probetas y en viga.
- 4.15. Al finalizar el hormigonado se colocarán clavos de medida de retracción en los extremos de la viga, a 10 cm de las caras frontal y dorsal del encofrado, y en el centro de la viga.

Tabla A3.1.2

Tipo de molde	Nº moldes	Ensayo	Edad	Volumen (l)
Viga pretensada	1	Longitud de Transmisión	48 horas, 7 días, 14, 28, 84, 168, 336, ...	42
Prismático 4×4×16 cm	1	Flexotracción/Compresión amasada 1	Edad transferencia/28 días	0.8
Prismático 4×4×16 cm	1	Flexotracción/Compresión amasada 2	Edad transferencia/28 días	0.8
Prismático 4×4×16 cm	1	Flexotracción/Compresión mezcla amasadas	Edad transferencia/28 días	0.8
Cúbico	1	Compresión	Edad transferencia	3
Cúbico	1	Compresión	28 días	3
Cilíndrico	2	Módulo deformación	Edad transferencia	10.6
Cilíndrico	2	Brasileño	Edad transferencia	10.6
Tracción directa	4	Tracción directa	Edad transferencia	0.5
Tracción directa	4	Tracción directa	28 días	0.5
Prismático 10×10×28.5 cm	1	Retracción Escuela	48 horas, 7 días, 14, 28, 84, 168, 336, ...	3
Cilíndrico	1	Retracción Oural	48 horas, 7 días, 14, 28, 84, 168, 336, ...	5.3
Volumen amasado = 45×2 L				Total = 81

## CURADO DE LA VIGA

- 4.16. Al cabo de una hora del final del vertido de hormigón se colocarán unos plásticos encima de la viga y de las probetas.
- 4.17. Transcurridas 4 horas del final de hormigonado se tomarán medidas iniciales de retracción y se colocarán papeles mojados encima de las probetas y viga, debajo de los plásticos.

### 5. DÍA I+1

- 5.1. Por la mañana se tomarán medidas de retracción en la viga y probetas.
- 5.2. Transcurridas 20 horas del hormigonado de la viga, se retirarán los papeles y plásticos de curado, y se desmoldarán la viga y las probetas.
- 5.3. Se limpiarán los costeros y las caras dorsal y frontal de la viga con acetona, y se lijará, y se replanteará la línea de mitad de sección.
- 5.4. Se colocará la cinta de pintor, dejando 1.5 cm para la colocación de la base de poliéster y los discos de extensometría.
- 5.5. Se marcarán las posiciones de las galgas extensométricas en la viga, que son las siguientes (véase la Figura A3.5-1):

Banda extensométrica	Posición
GH1	Centrada respecto GC1, cara Este
GH2	Centrada respecto a GC1, cara Oeste
GH3	Centrada respecto GC2, cara Este
GH4	Desde 26 a 36 cm de la cara Sur, cara Este
GH5	Desde 56 a 66 cm de la cara sur, cara Este
GH6	Centrada respecto GC3, cara Oeste
GH7	Desde 26 a 36 cm de la cara Norte, cara Oeste
GH8	Desde 56 a 66 cm de la cara Norte, cara Oeste

- 5.6. Después de 2 horas del desencofrado de la viga se colocará una base de poliéster a lo largo de las caras laterales de la viga.
- 5.7. Donde vaya a haber galgas se dejará pegado un trozo de teflón, así como en las caras frontal y dorsal de la viga, allí donde vayan a apoyar los LVDT.

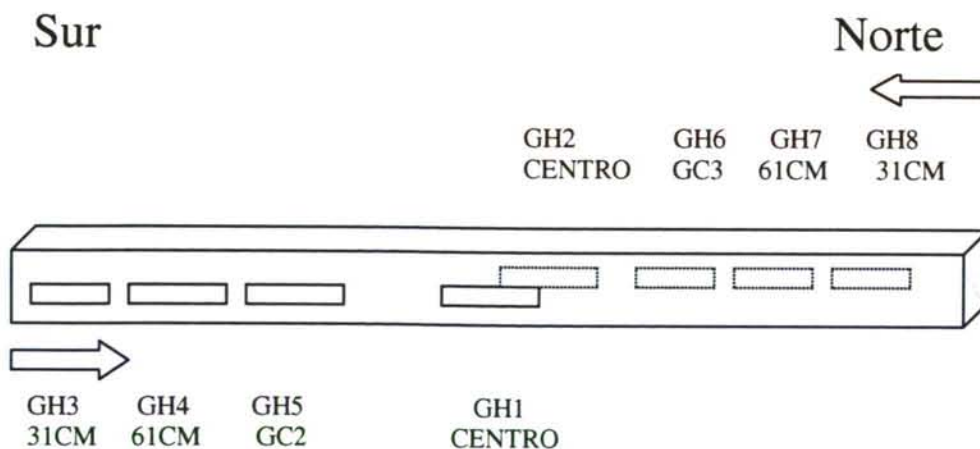


Figura A3.5-1



- 5.8. Transcurridas 5 horas de la colocación del PS, se replanteará la posición de los discos de extensometría y de las galgas a lo largo de la viga, mediante el colocador del extensómetro Demec. Primer y segundo tetón a 1 cm y 6 cm respectivamente del borde izquierdo de la cara.
- 5.9. Se pegarán los discos de extensometría a trozos de celofán de la siguiente manera (Figura A3.5-2)

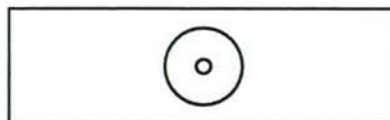


Figura A3.5-2

- 5.10. Transcurridas al menos 6 horas desde la colocación del PS, se pegarán los discos de extensometría, teniendo cuidado de que la colocación sea lo más precisa posible, adhiriendo el celofán que recubre los discos de extensometría a la cinta de pintor (Figura A3.5-3):

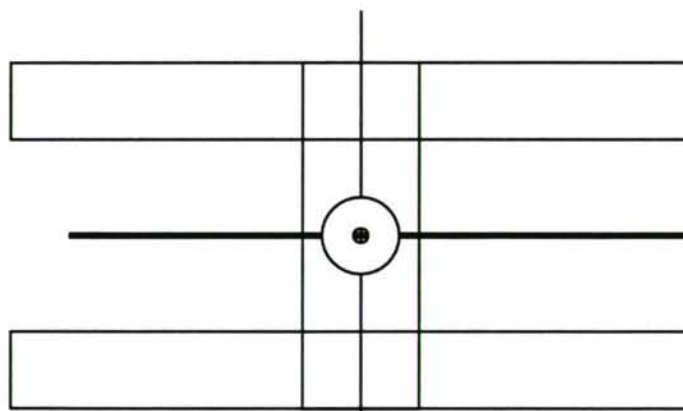


Figura A3.5-3

- 5.11. Se pegarán las galgas de hormigón a la superficie lateral de las vigas con PS.
- 5.12. Se comprobará la resistencia eléctrica de las galgas y la resistencia de las mismas con la base, y se anotarán los valores en la libreta de tesado.

## 6. DÍA I+2

- 6.1. Se medirá la retracción en la viga y en las probetas.
- 6.2. Se anotarán los valores de los canales activos.
- 6.3. Se tomarán medidas iniciales de los discos de extensometría. Para ello se desplazará el costero del lado en que estemos trabajando por encima de la viga, para facilitar la operación de medida. Se medirá dos veces cada par de discos de extensometría, se apuntará en una hoja: el par medido, medida 1 y medida 2, así como cualquier incidencia en la medida. Se tomará medida de invar al inicio (2 veces), y cada 10 medidas de discos de extensometría.
- 6.4. Si algún tetón da medida errónea o menor de 0.80 se arrancará y sustituirá por otro tetón, pegándolo con cianocrilato. Se tomará medida de referencia.
- 6.5. Se soldarán las galgas del hormigón y se comprobarán canales.

- 6.6. Se colocarán los transductores de desplazamiento Norte y Sur, comprobando en el SAD que la medida es mayor que 100.
- 6.7. Se inicializará el histórico del corte de la viga, por ejemplo 99EP1CT.DAT, (Enero de 1999, Prisma 1, Hormigón Convencional, Transferencia), con instrucciones de grabado cada 2 segundos.

### A3.2. TRANSFERENCIA DE PRETENSADO

- 6.8. Se prohibirá el acceso a las personas en la zona del laboratorio alineada con el cable de pretensado.
- 6.9. Se sujetará la cara sur de la viga a la bancada mediante cuerdas resistentes.
- 6.10. Se colocarán los costeros del molde a ambos lados de la viga, y se rellenará el espacio existente entre la viga y los costeros del molde de porexpán, en previsión de posibles golpes.
- 6.11. Se colocará la pinza del transductor de desplazamiento en el extremo activo del cable, sujeta a un cabo que cuelgue de la grúa, para prevenir que salga disparado el cabo del cordón.
- 6.12. Se colocará una cuña madera apoyada contra la hormigonera, enfrente del cabo de cable del lado sur, para evitar que el cabo salga despedido.
- 6.13. Se comprobará la frecuencia de grabación en el histórico: 2 segundos.
- 6.14. Se anotará el inicio y final de operación de corte.
- 6.15. La transferencia de pretensado se realizará de forma gradual, calentando una zona de 40 cm. Mediante el soplete, hasta llegar a tensión nula en el cable. En ese momento se cortará el cable.
- 6.16. Seguidamente, se cortará el cable ya sin tensión a unos 15 cm desde las caras norte y sur. Se recubrirán los extremos del cable de cinta aislante, para evitar accidentes.
- 6.17. Se modificará la frecuencia de grabación del histórico a 150 segundos.
- 6.18. Inmediatamente después del corte del cordón de pretensado, se medirán las deformaciones del hormigón, tanto en los discos de extensometría de retracción de la viga y de las probetas de retracción como en los discos de extensometría de las caras laterales de la viga.
- 6.19. Se medirán las deformaciones del hormigón tanto en los discos de extensometría de retracción de la viga y de las probetas de retracción como en los discos de extensometría de las caras laterales de la viga, una vez transcurridas 6 horas del corte de la pieza, y a las 24, 48, 72,... hasta una semana de edad.
- 6.20. No se desconectará el sistema de adquisición de datos hasta el tesado de la siguiente viga de pretensado.
- 6.21. Todos los días se anotarán las medidas de todos los canales, al inicio y al final de la jornada, y se compararán con las medidas anteriores, para detectar posibles irregularidades. Una vez por semana se enchufarán los canales de cada viga, para evaluar la deformación de las galgas del cable y del hormigón.
- 6.22. Se trasladará el prisma, cuidando de apoyarlo en el suficiente número de apoyos para garantizar esfuerzos mínimos de flexión. Los prismas se almacenarán sobre apoyos deslizantes, que permitan la libre deformación longitudinal, y a una altura que facilite la toma de medidas de extensometría mecánica, periódicamente.



## Anexo 4

# ANÁLISIS DEL TIPO DE TRANSFERENCIA

### A4.1. ANÁLISIS DE LA TRANSFERENCIA DE PRETENSADO DE LOS PRISMAS

Hagamos la hipótesis de que la transferencia se produce de forma gradual. De esta forma, paulatinamente se irán cortando los cordones de pretensado en la zona de corte, por lo que en esta zona se produce una disminución de área de pretensado resistente.

Durante el proceso de la transferencia las vigas no están en reposo, sino que se producen desplazamientos en las mismas en el sentido de alejarse de la zona de corte. De esta forma el pretensado de la zona de corte sufre una elongación, que implica una sobretensión.

Si suponemos que la transferencia se produce desde un extremo de la bancada, las vigas se desplazarán hacia el otro extremo hasta que se restablezca el equilibrio de fuerzas en ambos lados de las vigas.

La transferencia será gradual mientras la tensión del pretensado en la zona de corte no supere la carga unitaria máxima del pretensado. Si, supuesta la transferencia gradual, al calcular la elongación de la zona de corte, esta implica una deformación excesiva del pretensado de la zona de corte, que supere la deformación máxima, en ese momento dejará de cumplirse el equilibrio, lo que implica que la transferencia se producirá de forma súbita en ese momento, y pasará a ser un proceso dinámico.

Para el caso de un solo elemento pretensado en una bancada, como es el caso de los prismas fabricados en la bancada del laboratorio, al transferir desde un extremo, el planteamiento del equilibrio, suponiendo transferencia gradual queda:

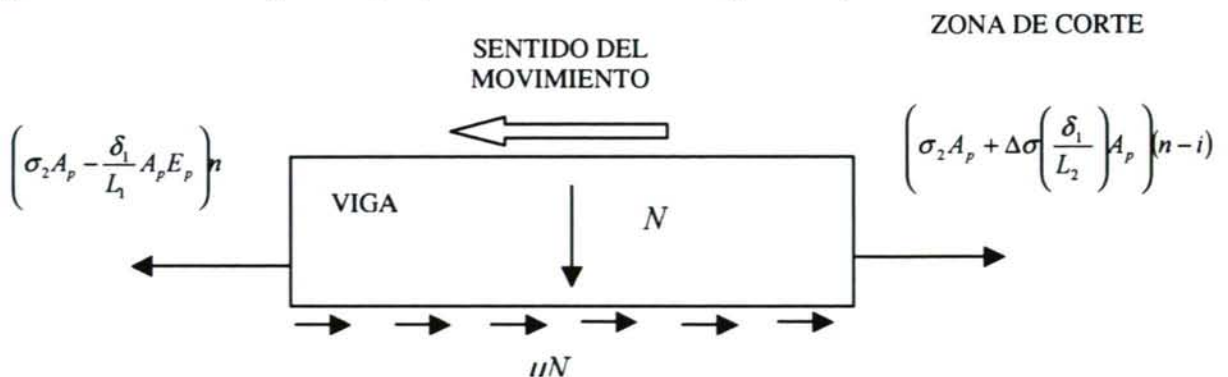


Figura A4.1-1

$A_p$	área de pretensado
$\sigma_2$	carga unitaria de tracción del pretensado
$L_1$	longitud de cable libre entre el punto de corte y la viga correspondiente
$L_2$	longitud de cable libre entre el punto de corte y la viga correspondiente
$\delta_1$	desplazamiento experimentado por las vigas alejándose de la zona de corte, hacia el anclaje correspondiente
$\delta_2$	desplazamiento experimentado por las vigas alejándose de la zona de corte, hacia el anclaje correspondiente
$L_c$	longitud de cable desnudo en la zona de corte
$i$	número de cordones de pretensado transferidos
$N$	peso propio de la viga para la que se plantea el equilibrio
$\mu$	coeficiente de rozamiento viga-solera
$n$	número de cordones de pretensado de la viga
$P_2$	fuerza de pretensado por cordón a la edad de transferencia
$E_p$	módulo de deformación longitudinal del pretensado
$\varepsilon_{pu}$	deformación del pretensado en rotura
$f_{pu}$	fuerza de pretensado correspondiente a la deformación de rotura
$\Delta\sigma\left(\frac{\delta_1}{L_2}\right)$	variación de tensión producida por una elongación de $\delta_1$

Tabla A4.1-1

	Zona de corte anclaje	Anclaje opuesto
Tensión inicial	$\sigma_2$	$\sigma_2$
Longitud cable desnudo	$L_1$	$L_2$
Cordones de pretensado activos	$n$	$n - i$
Desplazamiento	$+\delta_1$	$-\delta_1$
Longitud final	$L_1 + \delta_1$	$L_2 - \delta_1$
Tensión resultante	$\left(\sigma_2 A_p + \Delta\sigma\left(\frac{\delta_1}{L_1}\right) A_p\right)(n - i)$	$\left(\sigma_2 A_p - \Delta\sigma\left(\frac{\delta_1}{L_2}\right) A_p\right)n$
Resultante de fuerzas de rozamiento		$-\mu N$

Planteando el equilibrio del conjunto, despreciando el acortamiento experimentado por la viga, por lo que el alargamiento del pretensado de la zona de corte será igual al acortamiento del mismo en la zona opuesta, tendremos:

$$\left(\sigma_2 A_p - \frac{\delta_1}{L_2} A_p E_p\right)n - \mu N = \left(\sigma_2 A_p + \Delta\sigma\left(\frac{\delta_1}{L_1}\right) A_p\right)(n - i)$$

Esta condición de equilibrio se mantendrá mientras la tensión del pretensado no supere la tensión de plastificación.

La transferencia dejará de ser gradual cuando se cumpla:



$$\frac{\delta_1}{L_1} = \varepsilon_{pu}$$

siendo:

$\varepsilon_{pu}$  deformación del pretensado en rotura

$f_{pu}$  tensión del pretensado en rotura

Simplificadamente, si suponemos un comportamiento para el pretensado elástico y lineal hasta la plastificación del mismo, la ecuación anterior quedará:

$$\left( \sigma_2 A_p - \frac{\delta_1}{L_2} A_p E_p \right) n - \mu N = f_{pu} (n - i)$$

Resolviendo la anterior ecuación se puede obtener el número de cordones,  $i$ , tal que, una vez cortados desencadenarían la transferencia súbita. Si  $i \geq n$  se concluye que la transferencia es gradual. Si por el contrario  $i < n$ , una vez transferido  $i - 1$  cordones, se desencadenaría la transferencia súbita.

En el caso de los prismas de pretensado, este lo constituye un solo cordón. El pretensado se transfiere calentando gradualmente una zona de cordón de 40 cm, aproximadamente, hasta que van rompiendo los alambres. De esta forma, se puede determinar el número de alambres que han de romper para que se desencadene la rotura brusca. De todas formas, para pequeñas longitudes hay que tener en cuenta que la rotura de un alambre implica una pérdida de restricción sobre los restantes alambres, permitiendo un aumento del paso de hélice que implica un alargamiento del conjunto y por lo tanto una pérdida de tensión.

De esta forma se puede demostrar que la transferencia de pretensado gradual es viable en el caso de los prismas pretensados, para las dimensiones de la bancada del laboratorio.

## A4.2. ANÁLISIS DE LA TRANSFERENCIA DE PRETENSADO DE LAS VIGAS FABRICADAS

Antes de la transferencia era necesario prever qué tipo de transferencia se produciría con objeto de:

- Diseñar la distribución de las vigas en la bancada, la situación y longitud de la zona de corte, la separación entre vigas contiguas, la necesidad eventual de fabricar bloques de amortiguación para ajustar el modo de transferencia en lo posible a la realidad, ...
- Diseñar las medidas de seguridad pertinentes para las personas, equipos e instrumentación. Para esta última era necesario conocer un orden de magnitud para los desplazamientos de las vigas, a fin de disponer las holguras en los cables de instrumentación, a fin de evitar arrancamientos durante la transferencia.

Si planteamos el equilibrio de las vigas de la bancada en un momento de la transferencia, con las mismas hipótesis del apartado anterior, a saber:

- Se desprecia el acortamiento de las vigas durante la transferencia, por lo que se supone que se comportan como un sólido rígido, sólo se desplazan.
- En este apartado se considera el pretensado como perfectamente adherente dentro de las vigas durante la transferencia.

Las vigas presentan una tendencia a moverse, alejándose de la zona de corte. De forma genérica se plantea un instante de la transferencia, cuando se han cortado  $i$  cordones de pretensado en la zona central, haciendo la hipótesis de que las vigas a ambos lados del corte se desplazan hacia sus respectivos anclajes las distancias  $\delta_1$  y  $\delta_2$  respectivamente (véase la Figura A4.2-1). Suponiendo una tensión inicial constante a lo largo del pretensado, de valor  $\sigma_2$ , se tiene (Tabla A4.2-1):

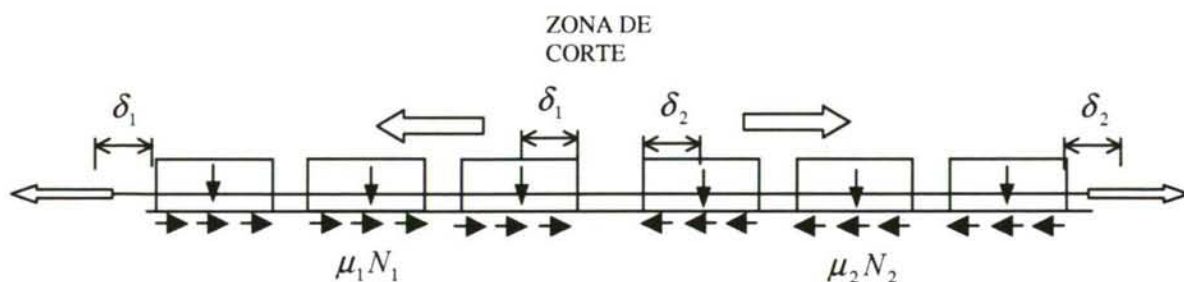


Figura A4.2-1

Tabla A4.2-1

	Anclaje izquierdo	Zona central	Anclaje derecho
Tensión inicial	$\sigma_2$	$\sigma_2$	$\sigma_2$
Longitud cable desnudo	$L_1$	$L_c$	$L_2$
Cordones de pretensado activos	$n$	$n - i$	$n$
Desplazamiento	$-\delta_1$	$\delta_1 + \delta_2$	$-\delta_2$
Longitud final	$L_1 - \delta_1$	$L_c + \delta_1 + \delta_2$	$L_2 - \delta_2$
Tensión resultante	$\sigma_2 - \Delta\sigma \left( \frac{\delta_1}{L_1} \right) A_p$	$\sigma_2 + \Delta\sigma \left( \frac{\delta_1 + \delta_2}{L_c} \right) A_p$	$\sigma_2 - \Delta\sigma \left( \frac{\delta_2}{L_2} \right) A_p$
Peso de las vigas a cada lado del corte	$N_1$		$N_2$
Resultante de fuerzas de rozamiento	$\mu_1 N_1$		$\mu_2 N_2$

La transferencia dejará de ser gradual cuando se cumpla:

$$\frac{\delta_1 + \delta_2}{L_c} = \epsilon_{pu}$$

Simplificadamente, si suponemos un comportamiento para el pretensado perfectamente elástico y lineal hasta  $\sigma_2$ , las ecuaciones anteriores quedarán:

$$n \left( \sigma_2 - \frac{E_p \delta_1}{L_1} \right) A_p - \mu_1 N_1 = f_{pu} A_p (n - i)$$



$$n \left( \sigma_2 - \frac{E_p \delta_2}{L_2} \right) A_p - \mu_2 N_2 = f_{pu} A_p (n - i)$$

Tenemos un sistema de tres ecuaciones lineales, con tres incógnitas, los desplazamientos  $\delta_1$  y  $\delta_2$ , y el número de cordones de pretensado,  $i$ , que una vez cortados desencadenan la rotura súbita por superarse la deformación última del pretensado en la zona de corte.

De esta forma se puede predecir la transferencia súbita o gradual de pretensado. Para que se produzca la transferencia gradual ha de cumplirse que  $i \geq n$ , al resolver el anterior sistema de ecuaciones.

Este procedimiento permite, conocida la distribución de vigas en la bancada, diseñar un proceso de transferencia gradual, controlando los desplazamientos experimentados por las vigas durante el proceso. Esto es muy útil ya que, por una parte, permite establecer las medidas de seguridad necesarias en cada caso y, por otra, posibilita controlar en fábrica el desplazamiento de las vigas durante la transferencia, que a veces se desea con valores moderados, para facilitar la retirada posterior de los costeros.

Con este procedimiento se puede demostrar que la transferencia gradual es inviable en las series de las vigas fabricadas para su ensayo, puesto que, una vez cortado el primer cordón se desencadenaría la transferencia súbita, fenómeno dinámico, por lo que los desplazamientos experimentados por las vigas serían elevados.

Como la transferencia gradual era inviable, se optó por calentar los 4 cordones de las vigas simultáneamente, a lo largo de 50 centímetros de la zona de 1.5 a 2 metros situada entre las vigas centrales, para que la pérdida de tensión fuese lo más uniforme posible en todos los cordones de pretensado en el momento de desencadenamiento de la transferencia súbita inevitable.

De hecho, el desplazamiento de las vigas durante la transferencia fue de varios metros. Para evitar este efecto, sería necesario fabricar los elementos ensayados en bancada más cortas, de modo que la longitud de cable desnudo fuese más reducida.

Una transferencia tan súbita no sucede en la producción, donde:

- La transferencia se realiza desde varios puntos a la vez, en extremos de bancada y entre vigas. El pretensado consiste en numerosos cordones de pretensado, por lo que cada vez que se corta uno de ellos, los demás son capaces de absorber la sobretensión originada sin superar su carga máxima.
- Los elementos fabricados superan con mucho el peso de las vigas fabricadas para su ensayo, por lo que el rozamiento vigas-solera es muy superior. Además, el pretensado de cada viga consta de muchos cordones de pretensado, por lo que un cordón es una parte mínima del pretensado total, lo que no ocurre en nuestro caso.
- Sólo al final del proceso, cuando quedan varios cordones y la rotura de uno de ellos origina una sobretensión que los restantes no pueden absorber, se desencadena la rotura brusca de los cordones restantes. Este impacto se produce sobre un elemento fuertemente pretensado por los cordones previamente cortados. Además, este impacto es parcialmente amortiguado por el elevado peso del elemento, de modo que el desplazamiento resultante es muy reducido.





## Anexo 5

# MÉTODO DE OBTENCIÓN DEL DIAGRAMA MOMENTO-CURVATURA TEÓRICO. FLEXOCOMPRESIÓN RECTA

### A5.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este anexo se explica la forma de obtención del comportamiento resistente hasta rotura de una sección transversal pretensada con pretensado adherente, situada en la zona central de la viga, es decir, fuera de la zona de anclaje. Se adoptan las siguientes hipótesis:

- Adherencia perfecta entre materiales: se supone que las armaduras longitudinales de la sección están perfectamente ancladas.
- Las secciones planas permanecen planas después de deformarse, por lo que este análisis es de aplicación a secciones fuera de la longitud de desarrollo.
- Se considera válido el principio de superposición.

Sea una sección de hormigón pretensado, sometida únicamente a la acción del propio pretensado. Si consideramos por separado la armadura activa y la sección neta (que realmente incluye a la armadura pasiva adherente) de hormigón, cada material estará sometido a las fuerzas de la Figura A5.1-1. La sección de hormigón presentará una deformación debida a la acción del pretensado (línea discontinua).

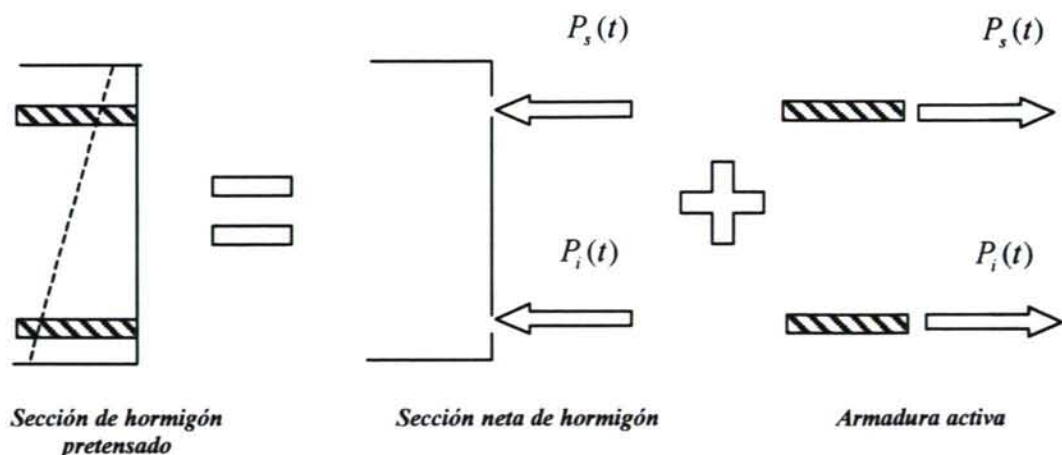


Figura A5.1-1: Equilibrio dentro de la sección de hormigón pretensado

donde:

$P_i(t)$  fuerza de pretensado inferior a la edad  $t$

$P_s(t)$  fuerza de pretensado superior a la edad  $t$

Se define fuerza de neutralización (MURC93) como la fuerza que, aplicada como tracción en el c.d.g. del pretensado de la sección homogeneizada, anula las tensiones en el hormigón producidas por el propio pretensado. La fuerza de neutralización varía según la edad, debido a las pérdidas de pretensado. En la Figura A5.1-2 se aprecia el efecto de la aplicación de la fuerza de neutralización solicitando la sección transversal sobre cada uno de los materiales.

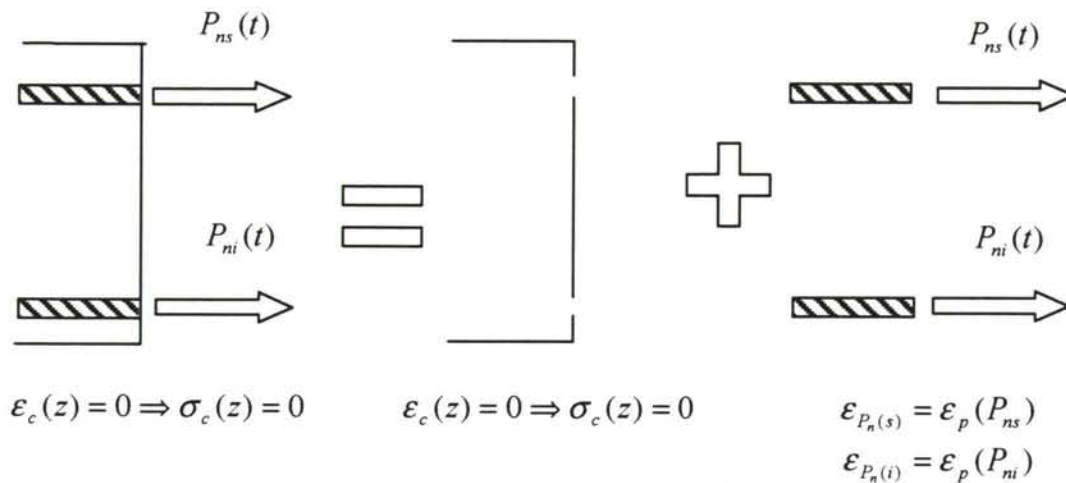


Figura A5.1-2: Aplicación de la fuerza de neutralización como solicitación exterior a la sección

donde:

$P_{ns}(t)$  fuerza de neutralización del pretensado superior

$P_{ni}(t)$  fuerza de neutralización del pretensado inferior

$\varepsilon_c(z)$  deformación del hormigón a la altura de la fibra  $z$

$\sigma_c(z)$  tensión del hormigón a la altura de la fibra  $z$

$\varepsilon_{P_n(s)} = \varepsilon_p(P_{ns})$  deformación del pretensado superior, producida por la fuerza de neutralización,  $P_{ns}$

$\varepsilon_{P_n(i)} = \varepsilon_p(P_{ni})$  deformación del pretensado inferior, producida por la fuerza de neutralización,  $P_{ni}$

Si aplicamos sobre la sección pretensada una solicitación exterior igual a la fuerza de neutralización, por definición se anularán las tensiones en el hormigón. De esta forma, planteando el equilibrio solicitación-respuesta, la armadura activa estará solicitada por una tracción cuya resultante es precisamente la fuerza de neutralización. Es decir, la aplicación de la fuerza de neutralización a la sección de hormigón pretensado conduce a un estado de tensión nula en el hormigón, mientras que el pretensado está sometido a la totalidad de la fuerza de neutralización.

La fuerza de neutralización es un artificio matemático, cuya aplicación tiene como finalidad determinar un origen de coordenadas conveniente, el estado tensional nulo en



el hormigón, para poder aplicar los dominios de rotura, de forma análoga a las secciones de hormigón armado (MURC93).

En una viga de hormigón pretensado, la rotura por flexión compuesta recta se puede alcanzar de dos modos:

- Por agotamiento del hormigón a compresión, antes de que se haya agotado la capacidad resistente de la armadura traccionada. La rotura puede ser dúctil (si ha plastificado previamente la armadura activa traccionada) o frágil (si la armadura activa traccionada no ha alcanzado antes el límite elástico).
- Por deformación excesiva de la armadura traccionada. Hemos asumido la hipótesis de adherencia perfecta entre hormigón y acero, a pesar de la fisuración del hormigón en la parte traccionada de la sección. Tradicionalmente se considera un valor límite de la variación de deformación de la armadura a tracción. Si ese límite se sobrepasa, no se puede considerar que el hormigón “acompañe” a las armaduras en su deformación, por lo que deja de cumplirse la adherencia perfecta. Esta limitación, aplicada al pretensado es la siguiente:

$$\Delta \varepsilon_{pi} = \varepsilon_c(z = d_{pi}) = 0.01$$

válida siempre y cuando

$$\varepsilon_{pi} = \varepsilon_{p_m} + 0.01 < \varepsilon_{p_{m\acute{a}x}}$$

donde:

$\Delta \varepsilon_{pi}$	variación de deformación del pretensado más traccionado
$\varepsilon_{pi}$	deformación total del pretensado traccionado
$\varepsilon_{p_{m\acute{a}x}}$	deformación del pretensado correspondiente a la carga unitaria máxima

Para obtener el diagrama momento-curvatura de la sección de hormigón pretensado, sometida a una sollicitación de flexión compuesta recta (con axil genérico constante durante el proceso de carga, y momento flector creciente), se ha aplicado el principio de superposición a la sección de hormigón pretensado (Figura A5.1-3).

El estado de sollicitación de la sección se descompone en la suma de dos estados: en primer lugar, se aplica la fuerza de neutralización a la sección sin sollicitar, para anular las deformaciones del hormigón inducidas por el pretensado. Ahora ya se pueden aplicar los dominios de rotura a la sección sometida a la sollicitación, y a la fuerza de neutralización cambiada de signo.

## A5.2. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DE OBTENCIÓN DEL DIAGRAMA MOMENTO-CURVATURA

El programa<sup>A5.1</sup> permite la obtención del diagrama momento-curvatura completo, para cualquier sección de cualquier material, sometida a flexión compuesta recta. El cálculo de los diagramas se realiza con ayuda de la hoja de calculo Excel y código en Visual Basic for Applications (VBA).

<sup>A5.1</sup> La labor de programación fue desarrollada por el estudiante de quinto curso de la E.T.S.I.C.C.P. Miguel Pintado Serrano, becario del Laboratorio de Ingeniería de la Construcción.

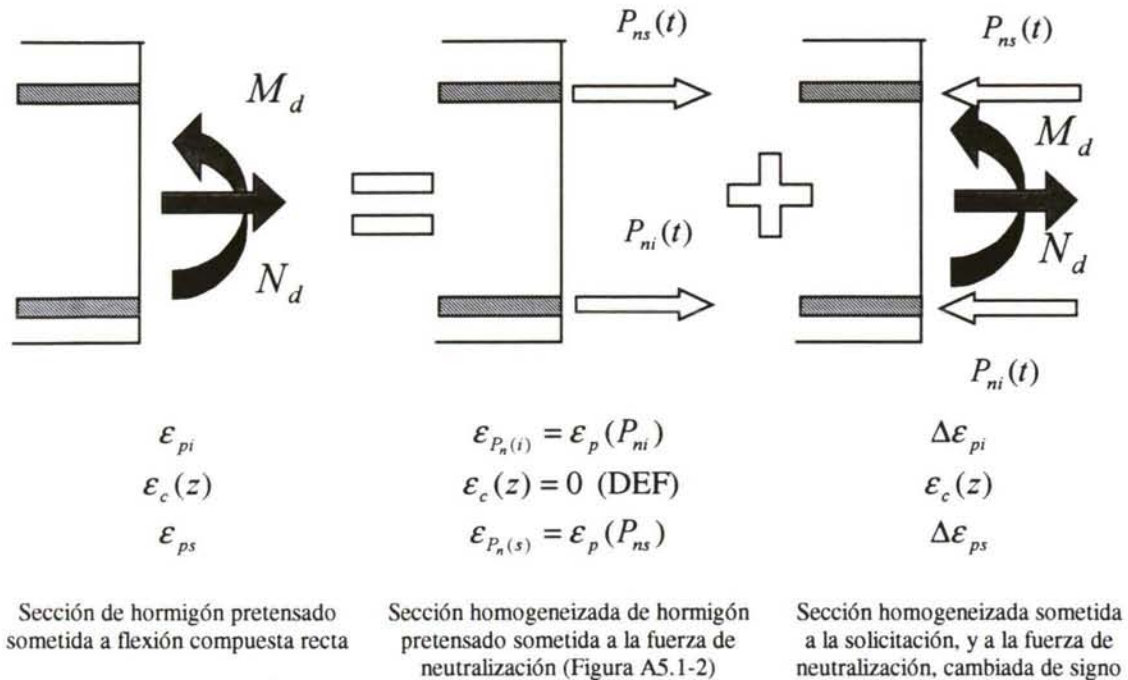


Figura A5.1-3: Aplicación de la fuerza de neutralización

Aparte de las hipótesis anteriores, hay que tener en cuenta que:

- El comportamiento de los materiales se define mediante diagramas carga unitaria-deformación genéricos de todos los materiales que componen la sección (véase Figura A5.2-1 para el pretensado), definidos por puntos. Esto se ha aplicado para el hormigón, puesto que en cada caso se determinaron los diagramas tensión-deformación a la edad de ensayo de la viga. Se ha aproximado la rama de tracción, extrapolando el módulo de deformación secante a la rama de tracción, hasta la resistencia a tracción directa estimada. La deformación de hormigón en rotura viene dada por el último punto de la rama de compresión, del diagrama tensión-deformación adoptado.
- En esta investigación se adoptó para la armadura pasiva de acero B500S el diagrama característico a tracción de la EHE (EHE98, 38.2). Se adoptó un diagrama simétrico respecto al origen de coordenadas, para la rama a compresión.
- En esta investigación se adoptó por el diagrama de cálculo de las armaduras activas propuesto por la EHE (EHE98, 38.5), al que se le ha aplicado los valores de módulo de deformación medio y el límite elástico al 0.2%, garantizado por el fabricante.
- La máxima variación de deformación de las armaduras a tracción se ha fijado en un 1%, como se ha explicado antes.
- Aparte de la geometría de la sección, y del comportamiento de los materiales, se introducen los valores de la fuerza de neutralización de pretensado, para cada una de las capas de pretensado dispuestas.



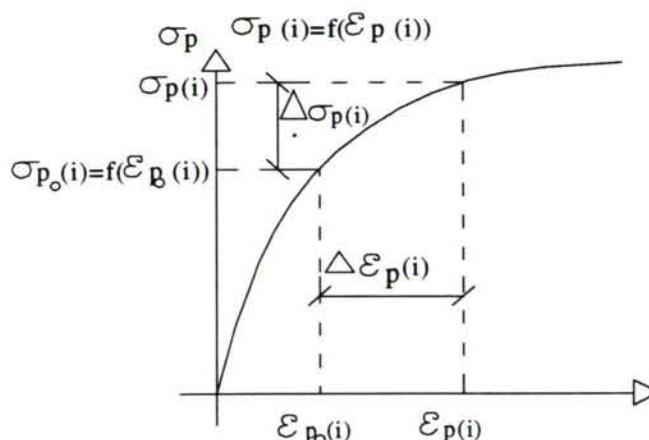


Figura A5.2-1: Diagrama carga unitaria-deformación genérico del cordón de pretensado

- La geometría de la sección se define por puntos, indicando su profundidad desde la fibra superior y la anchura de la pieza a esa profundidad.

### A5.3. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

El programa se basa en la resolución de las ecuaciones de compatibilidad y de equilibrio entre la sollicitación y la respuesta de la sección. El equilibrio se establece entre los esfuerzos que solicitan a la sección (axil genérico fijo, momento flector creciente) y la respuesta del material, en forma de resultantes de las tensiones. En la Figura A5.3-1 aparece la nomenclatura empleada.

1. Se fija un valor para la deformación de la fibra más comprimida,  $\varepsilon_c$ .
2. Mediante la resolución de la ecuación (1), se obtiene el valor de la profundidad de la fibra neutra,  $x$ .
3. Conocidos  $\varepsilon_c$  y  $x$  se determina el valor de la curvatura de la sección

$$\chi = \operatorname{tg} \varphi = \frac{\varepsilon_c}{x}$$

4. Conocido el plano de deformación de la sección, queda perfectamente definido el estado tenso-deformacional de cada material. Conocemos las tensiones de cada uno de los materiales (ecuaciones constitutivas (2), (3) y (4)).
5. Se calcula el momento flector resistido, a partir de la ecuación (5),  $M_d$ .
6. Ya conocemos un punto del diagrama momento-curvatura:

$$P(\chi, M_d)$$

7. Se calculan las deformaciones de cada material. Se verifica si alguno de ellos se ha agotado. En ese caso, se da por finalizado el diagrama momento curvatura. En caso contrario, se fija un nuevo valor de

$$\varepsilon_c \Rightarrow \varepsilon_c + \Delta \varepsilon_c$$

8. Se vuelve al punto 1.

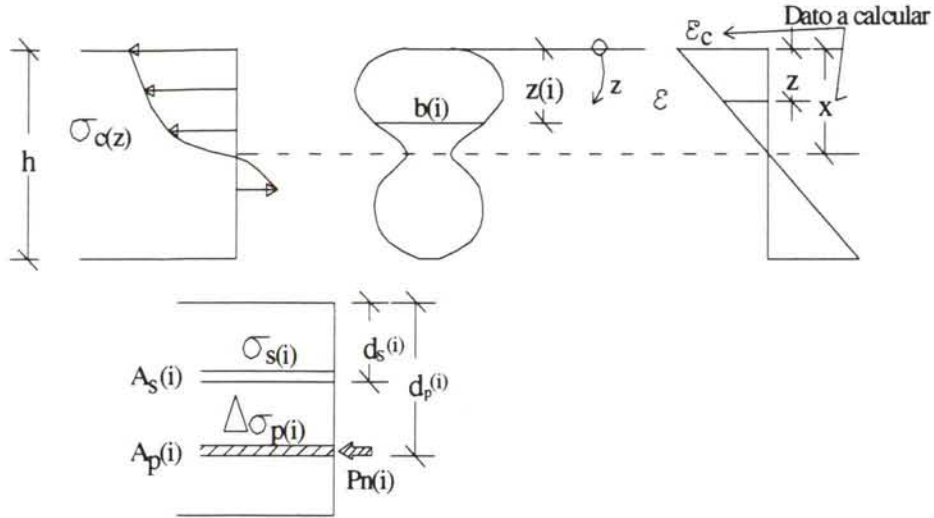


Figura A5.3-1

Planteando el equilibrio de fuerzas horizontales:

$$\int_0^h \sigma_c(z) \cdot b(z) \cdot dz + \sum_{i=1}^{n_s} A_s(i) \cdot \sigma_s(d_s(i)) + \sum_{i=1}^{n_p} A_p(i) \cdot \Delta \sigma_p(d_p(i)) = \sum_{i=1}^{n_p} P_n(i) + N_d \quad (1)$$

donde:

$\sigma_c(z)$  tensión en el hormigón, en la fibra  $z$

$b(z)$  ancho de la sección en la fibra  $z$

$A_s(i)$  área de la armadura pasiva, en la fibra  $z$

$A_p(i)$  área de la armadura activa, en la fibra  $z$

$\sigma_s(z)$  tensión en la armadura pasiva de la capa  $z$

$\Delta \sigma_p(z)$  variación de tensión en el pretensado, a partir de la correspondiente a la fuerza de neutralización, de la capa  $z$

$P_n(i)$  fuerza de neutralización de la capa de pretensado  $i$

$d_s(i)$  canto útil de la armadura pasiva de la capa  $i$

$d_p(i)$  canto útil de la armadura activa de la capa  $i$

$e$  distancia de la fibra más comprimida al punto de aplicación del axil exterior

$N_d$

$N_d$  axil extremo aplicado en la sección, con una excentricidad  $e$

$$\sigma_c(z) = \sigma_c(\epsilon_c(z)) = \sigma_c \left( \left( 1 - \frac{z}{x} \right) \cdot \epsilon_c \right) \quad (2)$$

$$\sigma_s(d_s(i)) = \sigma_s \left( \left( 1 - \frac{d_s(i)}{x} \right) \cdot \epsilon_c \right) \quad (3)$$

$$\Delta \sigma_p(i) = \sigma_p(i) - \sigma_{p_o}(i) = \sigma_p(\epsilon_{p_o}(i) + \Delta \epsilon_p(i)) - \sigma_{p_o}(i) \quad (4)$$



La integral que se plantea se resuelve por la regla de Simpson compuesta. Después se tiene una función que sólo depende de  $x$ . Para obtener la solución se ha programado el método de Newton de cálculo de raíces de funciones a partir de una solución inicial:

$$x^0 \Rightarrow x^{k+1} = x^k - \frac{f(x^k)}{f'(x^k)}$$

Para solucionar la integral se emplea una cuadratura centrada de segundo orden:

$$f'(x^k) = \frac{f(x^k + h) - f(x^k - h)}{2h}$$

Se itera hasta los errores relativos y absolutos sean menores que los fijados, entre la iteración  $k$  y  $k_{total}$ .

El momento flector resultante, calculado respecto al centro de gravedad de la sección bruta, es:

$$M_d = \int_0^h \sigma_c(z) \cdot b(z) \cdot (z - z_{cdg}) dz + \sum_{i=1}^{n_s} A_s(i) \cdot \sigma_s(i) \cdot (d_s(i) - z_{cdg}) + \sum_{i=1}^{n_p} (A_p(i) \cdot (d_p(i) - z_{cdg})) - N_d \cdot (e - z_{cdg}) \quad (5)$$

donde:

$z_{cdg}$  centro de gravedad de la sección bruta

El programa calcula automáticamente los siguientes diagramas:

- Momento-Curvatura.
- Momento-Tensión total en el acero activo.
- Momento-Tensión en el acero pasivo.
- Curvatura-Tensión en el acero activo.
- Curvatura-Tensión en el acero pasivo.





## *Anexo 6*

# **PROCESO DE FABRICACIÓN Y DE ENSAYO DE LAS VIGAS PRETENSADAS**

### **A6.1. PROCESO DE FABRICACIÓN DE LAS VIGAS**

Seguidamente se resume el proceso de fabricación de las vigas:

#### **Operaciones previas**

- Toma de muestras de las sacas de arlita, para la determinación de la humedad. Determinación de la humedad media.
- Preparación de la arlita con el contenido prefijado de humedad del 10%, mediante homogeneización en camión hormigonera, unos días antes del amasado. Descarga a silos.
- Enfilado de cables de pretensado. Limpieza de los cordones de pretensado con acetona.
- Tesado inicial a 175 kN, para facilitar el replanteo y colocación de la instrumentación.
- Replanteo de vigas y galgas extensométricas en la bancada y cables.
- Pegado de galgas extensométricas en los cordones.
- Toma de medidas de referencia de las bandas extensométricas.
- Destesado de los cordones. Colocación de las células de carga en los anclajes.

#### **Tesado de cordones de pretensado**

- Tesado definitivo a 203 kN cada cordón, control de tesado por alargamiento habitual en fábrica y control de instrumentación.
- Protección e impermeabilización de las galgas extensométricas.
- Toma de medidas de las galgas extensométricas.
- Colocación de la armadura pasiva, de confinamiento y suspensión de las vigas.
- Replanteo definitivo de los separadores de las vigas.
- Colocación de los costeros de los moldes.

#### **Hormigonado de vigas y probetas de acompañamiento**

- Amasado y llenado de los moldes de las vigas.
- Llenado moldes probetas.
- Colocación tetones retracción.
- Curado con papeles mojados, plásticos.
- Toma de medidas de los tetones de retracción.

### Colocación de instrumentación del hormigón y ensayos previos

- Desmoldado de las vigas y probetas.
- Replanteo de los discos de extensometría.
- Colocación de la base de adhesivo PS.
- Pegado de discos de extensometría.
- Refrentado de probetas.
- Pegado y conexión de galgas hormigón en vigas y probetas.
- Transporte probetas a ensayar en los Laboratorios de Cementos Cosmos, Oural, y de Ingeniería de la Construcción, ETSICCP de La Coruña.
- Medida de los discos de extensometría antes de la transferencia.
- Toma de medidas de la instrumentación de las vigas.
- Ensayo de probetas para determinar la edad de transferencia.
- Medida de discos de extensometría antes transferencia.
- Toma de medidas de la instrumentación de las vigas.

### Transferencia de pretensado

- Preparación de la configuración del SAD durante la transferencia.
- Adopción de las medidas de seguridad durante la transferencia.
- Transferencia de pretensado.
- Toma de medidas de la instrumentación de las vigas después de transferencia.
- Medida de la penetración de los cordones de pretensado.
- Examen de las vigas para determinar eventual aparición de fisuras tras la transferencia.
- Medida de contraflechas tras transferencia.
- Transporte de vigas al laboratorio de ingeniería de la construcción.
- Medida de contraflechas.
- Examen de las vigas para determinar eventual aparición de fisuras tras la transferencia.

## A6.2. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO A FLEXIÓN DE LAS VIGAS

### A6.2.1. PLAN SEMANAL (Tabla A6.2.1-1)

Tabla A6.2.1-1

Día	Mañana	Tarde
Lunes	Ordenar y archivar. Mapas de fisuras. Desmontar pórticos	Enchufar vigas restantes. Contraflechas otras vigas
Martes	Mortero de nivelación/PS siguiente viga. Pesado y refrentado de las probetas cilíndricas	Placas/soporte bolígrafo. Colocar galgas viga + probetas
Miércoles	Soldar galgas. Pegar tetones	Replantar la posición de la viga a ensayar. Colocar viga reparto y pórtico. Medir tetones.
Jueves	Medir tetones. Ensayo de la viga.	Ensayo probetas viga correspondiente. Mover prismas laboratorio pequeño
Viernes	Desmontar la bancada/ montar los pórticos. Comprobar material necesario para el siguiente ensayo: pedidos y compras	



### A6.2.2. OPERACIONES PREVIAS AL ENSAYO DE LA VIGA

- 1) Trasladar una escalera plegable al laboratorio, para maniobrar en el pórtico.
- 2) Ordenar la zona de trabajo y los utensilios de medición y herramientas.
- 3) Fijar criterio de marcado de fisuras en hojas de fisuración (Tabla A6.2.2-1).

*Tabla A6.2.2-1*

<b>Tipos de trazo</b>	<b>Color del trazo</b>
-----	AZUL
-.-.-.-.-	ROJO
-X-X-X-X-X-X-	(VERDE)
_____	
_._._._._	
-XX-XX-XX-XX-XX-XX-XX-	

- 4) Medida del avance de las fisuras ya existentes. Marcar con claridad el final y ancho de fisuras.
- 5) Replanteo de la situación de las placas de apoyo: de 52.5 a 67.5 cm desde cada extremo, en caras Este y Oeste.
- 6) Replanteo de los aparatos de apoyo intermedios en la cara superior de la viga de hormigón. Dibujar en las caras laterales de la viga líneas de referencia para los posteriores montajes fotográficos, con las distancias a extremos de la viga.
- 7) Toma de medidas de las células de carga, ponerlas a cero. Fijar periodo de grabación del ensayo cada dos segundos.
- 8) Marcado de los tetones coincidentes con las galgas de cable inferior
- 9) Verificación de la correcta alineación y distancia de los aparatos de apoyo/células de carga, respecto al eje del pórtico de ensayos.
- 10) Comprobación de la adecuada nivelación de los apoyos.
- 11) Izado de la viga, unos 50 cm. Retirada de placas de apoyo existentes. Comprobación de ancho de fisuras y prolongación de las mismas bajo la viga. Fotos de la parte inferior.
- 12) Colocación de las placas de apoyo en su posición correcta, sujetar mediante cinta de embalar transparente.
- 13) Replanteo de los aparatos de apoyo en las bancadas de protección.

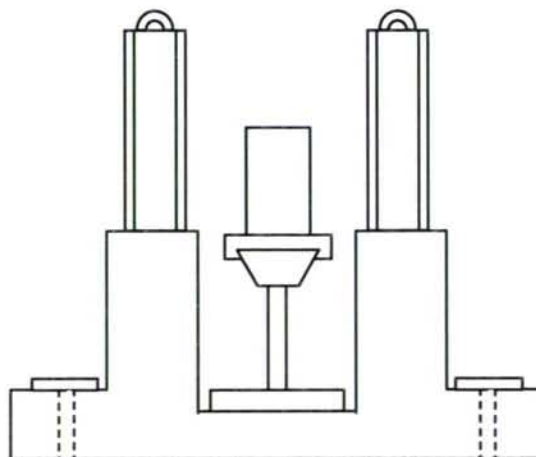


Figura A6.2.2-1

- 14) Colocación de la viga de hormigón en posición, comprobando el correcto centrado de la viga en los rodillos de apoyo (Figura A6.2.2-1). Durante esta operación una

persona verificará que los cables de los puentes grúa se encuentren perfectamente verticales y paralelos entre sí, para evitar balanceos indeseados de la viga.

15) Corte con la amoladora de los ganchos de sujeción de la viga.

16) Colocación de los topes de la viga (Figura A6.2.2-2).

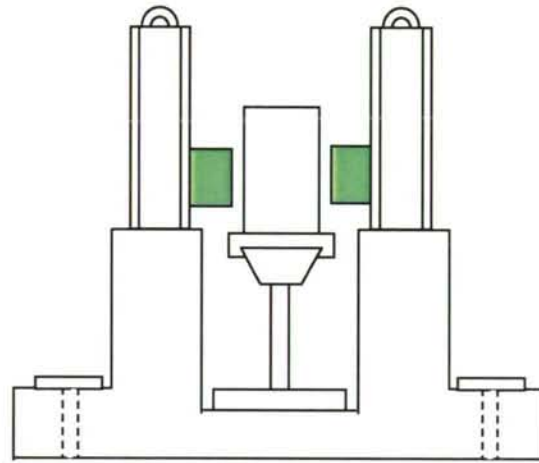


Figura A6.2.2-2

17) Toma de medida de los tetones de la viga.

18) Colocación de los plásticos a la altura del centro luz de la viga, y encima papeles, debajo del “bolígrafo”, antes de colocar la bandeja metálica y los soportes de los transductores.

19) Colocación en posición los transductores de desplazamiento de las zonas de anclaje. Marcado del punto de apoyo de los transductores en las placas, para detectar el posible giro de los mismos (Figura A6.2.2-3).

20) Colocación del transductor de medición de flechas, comprobando que el cable del transductor salga “por encima” del transductor, y en el caso de rotura de la viga no se pince.



Figura A6.2.2-3

### A6.2.3. ENSAYO PROPIAMENTE DICHO

21) Encendido del ordenador del sistema de adquisición de datos.

22) Abrir el explorador de Windows. Pulsar en C:/ el botón derecho del ratón y consultar propiedades. Verificar que la memoria disponible sea superior a 250 Mb.

23) Enchufado las galgas y transductores.



- 24) Abrir el archivo correspondiente en el System 5000. Anotar cuidadosamente el archivo que se ha abierto, día y hora en la hoja de ensayo.
- 25) Comprobación de la frecuencia de grabación, ha de ser de 2 segundos. Número máximo de registros, el número más grande que quepa.
- 26) Toma de medidas de referencia de la totalidad de los aparatos de medida. Medir tetones. Anotación cuidadosa del peso de la viga y la reacción de cada apoyo.
- 27) Colocación de los apoyos intermedios de la viga de reparto. Acuñado del aparato deslizante y fijación del giro de la articulación (Figura A6.2.3-1).

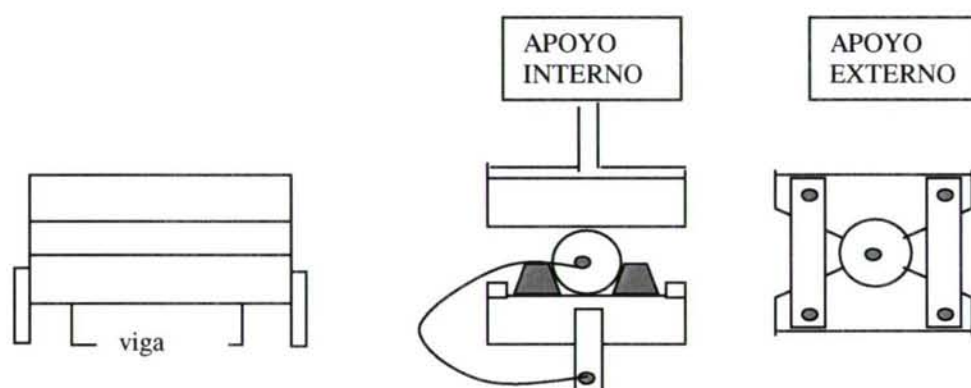


Figura A6.2.3-1

- 28) Izado con ambos puentes grúa de la viga de reparto metálica, unos 50 cm. Colocación de las placas de apoyo de 50 mm de espesor en su posición correcta, sujeción mediante cinta de embalar.
- 29) Colocación de la viga de reparto en posición, comprobando el correcto centrado de la viga en los dispositivos de apoyo. Durante esta operación una persona verificará que los cables de los puentes grúa se encuentren perfectamente verticales y paralelos entre sí, para evitar balanceos indeseados en la viga.
- 30) Asegurar los aparatos de apoyo según la Figura A6.2.3-2.

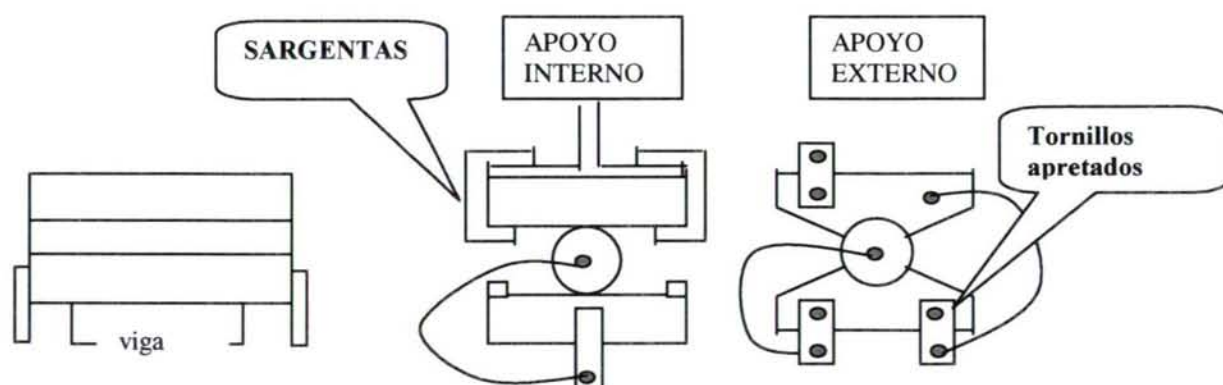


Figura A6.2.3-2

- 31) Colocación de los topes de la viga metálica, fijándolos mediante tornillos (Figura A6.2.3-3).

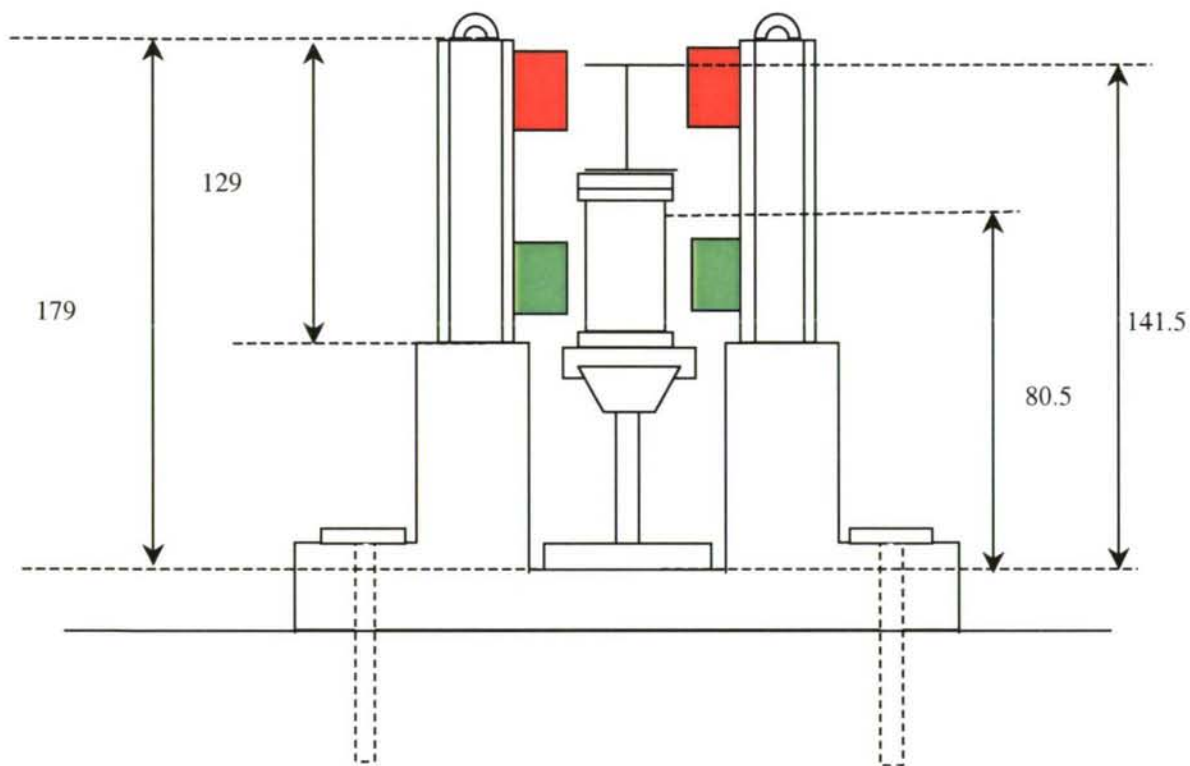


Figura A6.2.3-3

- 32) Colocación de los tabloncillos de amortiguación de la caída del pórtico.
- 33) Bajar a la parte inferior de la losa. Asegurarse de que las protecciones de las vigas están ancladas a la losa.
- 34) Retirar las placas de anclaje del pórtico de ensayos en la parte inferior de la losa. Proteger las roscas del pórtico mediante fundas de plástico.
- 35) Trasladar el pórtico de ensayos a la zona de ensayos, centrar respecto a la viga metálica de reparto.
- 36) Apoyar suavemente el pórtico encima de la viga metálica de reparto.
- 37) Determinar las reacciones en apoyos y el momento flector actuante en la zona central.
- 38) Anclar el pórtico de ensayos en la cara inferior de la losa, vigilando la verticalidad del mismo con el nivel.
- 39) Sujetar mediante un cable al pórtico las mangueras del gato de carga, para evitar aplastamiento durante el ensayo.
- 40) Determinar las reacciones en apoyos y el momento flector actuante en la zona central.
- 41) Medir los tetones de la viga, finales hasta longitud de transmisión medida + 15 cm, ambos extremos, y las de las galgas de hormigón. Para eso conviene que haya dos equipos midiendo, para que sea más rápido 4 personas, con diferentes extensómetros mecánicos, una persona controlando el ordenador, por seguridad, vigilando las células de carga de los apoyos, y controlando flecha de transductores y una sexta persona midiendo fisuras y colocando transductores en su sitio si es necesario. Hacen falta 8 transductores. En ese caso, no es necesaria la pizarra de control de flechas.
- 42) Colocar la pizarra de control de flechas.
- 43) Comprobar que las llaves de paso de aceite están alineadas con la manguera.
- 44) Encender los ordenadores del sistema oleohidráulico estático.



- 45) Inicializar un archivo de registro del ensayo 99-mes-día-v..., para grabar las lecturas de presión del sistema oleohidráulico estático.
- 46) Encender el sistema oleohidráulico, y esperar 5 minutos al calentamiento del mismo.
- 47) Comprobar la velocidad de carga de cada gato. Velocidad de ensayo de 80 kP por segundo. Hasta una cierta carga, por ejemplo 20 mT.
- 48) Flecha final = a la final de las vigas de hormigón ligero antes de romper de 120 mm.
- 49) Comienzo del ensayo. Después de cada escalón, realizar:
  - A. Grabación de datos (save).
  - B. Anotar la carga alcanzada, número de registro de grabación, medidas de transductores, ... en la hoja del ensayo.
  - C. Si el transductor de medida de la flecha en CL marca menos de 20 mm, recolocar, y tomar medida de nuevo origen.
  - D. Comprobar y anotar galgas rotas.
  - E. Fijar criterio de marcado de fisuras.
  - F. Medir carrera del gato. Anotarla.
  - G. Anotar en la pizarra de medición de flecha, la carga aplicada por el gato.
  - H. Si estamos cerca de la rotura, cambio de frecuencia de grabación a 1 segundo (record).
  - I. Determinar las reacciones en apoyos y el momento flector actuante en la zona central.
  - J. Comprobar la verticalidad de las secciones centrales de la viga a simple vista y con el nivel.
  - K. Comprobar cinta de vídeo.
  - L. Comprobar que no se haya salido/agotado o movido ningún transductor.
  - M. Comprobar galgas rotas en el ordenador.
  - N. Comprobación avance de fisuras. Marcado de fisuras.
  - O. Determinación aproximada de ancho de fisuras y de la longitud de estas.
  - P. Medida de tetones en escalones "estratégicos".

Tras la rotura:

1. Apagar el sistema oleohidráulico estático.
2. Comprobar estado de transductores/ placas de apoyo.
3. Cambiar frecuencia de grabación a 5 segundos.
4. Dejar grabando 20 minutos más.
5. Apagar el SAD.
6. Grabar datos.
7. Fotos de la viga: fisuras y aspecto de los anclajes. Si alguna placa de apoyo de los transductores se ha desprendido, anotarlo en la libreta de fisuras.
8. Vídeo del aspecto de la viga tras la rotura.
9. Realización de mapas de fisuras de todas las caras de la viga: anotar inicio y fin de fisura, abertura de las más características.

#### **A6.2.4. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN TRAS LA ROTURA DE LA VIGA**

- 1) Se pesarán las probetas de caracterización del ensayo de la viga correspondiente.

- 2) El refrentado de las probetas tendrá lugar como mínimo 24 horas antes de su ensayo.
- 3) Se situarán las probetas cilíndricas en una superficie horizontal y limpia. La horizontalidad se comprobará con el nivel de aluminio.
- 4) Se replantearán en cada probeta cilíndrica 2 galgas verticales, a 2 cm a la derecha de cada "costura" de la probeta, con el centro exactamente a 15 cm de la base de la probeta.
- 5) Se replantearán en cada probeta cilíndrica 2 galgas horizontales centradas respecto a las anteriores, a exactamente 15 cm de la base de la probeta.
- 6) Se pegarán en cada probeta las 4 galgas de hormigón sobre una base de PS.
- 7) Se numerarán las galgas, de 1 a 3 las de la probeta cúbica y de 1 a 4 (1 y 2 las longitudinales y 3 y 4 las transversales) de cada probeta.
- 8) Antes de proceder al soldado de las conexiones, se comprobará con la linterna que el grado de adhesión del conjunto hormigón/PS/galga es adecuado.
- 9) Se soldarán las conexiones.
- 10) Se ensayará a compresión 1 probeta cúbica y se anotará la resistencia.
- 11) Se inicializará el histórico de la viga correspondiente 99-mes-viga, con frecuencia de grabación de 2 segundos.
- 12) Se enchufarán por orden las galgas extensométricas de la otra probeta cúbica en el sistema de adquisición de datos:

Galga	Canal
1	102
2	103
3	104
4	106

- 13) Se programará un cuádruple ciclo de carga para la probeta cúbica instrumentada, con una velocidad de 2.409 kN/seg.
- 14) Se extrapolará la resistencia en probeta cilíndrica del resultado anterior y la experiencia previa con el mismo tipo de hormigón.
- 15) Se ensayarán a módulo de deformación las probetas cilíndricas, utilizando simultáneamente el dispositivo de determinación de módulos y el SAD del Laboratorio de Ingeniería de la Construcción.
- 16) Los fragmentos de las probetas cúbicas se desmenuzarán y se pesarán, y se introducirán en estufa para poder determinar la densidad seca del hormigón ensayado.

#### **A6.2.5. DESMONTAJE DE LA VIGA**

1. Ordenar y archivar la documentación generada durante el ensayo anterior.
2. Retirar todos los cables de instrumentación de debajo de la viga, y los transductores de desplazamiento.
3. Antes de proceder al desmontaje de la viga en cuestión, apretar las tuercas del pórtico, para evitar balanceo mientras se vuelve a colocar el gato.
4. Colocar debajo de la viga de hormigón, en centro luz, la caja de madera del gato, llena de probetas de hormigón cilíndricas, para evitar que al levantar el pórtico o la viga metálica, caiga la viga de hormigón (Figura A6.2.3-5).



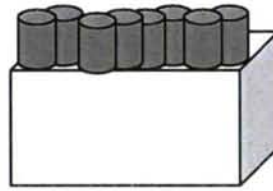


Figura A6.2.3-5

5. Para que retroceda el pistón de los gatos: colocar el manivela de cada gato en sentido perpendicular a la manguera transparente. Apartarse del pórtico. Encender el ordenador de control de la central, entrar en el programa de relajación y pulsar el botón de encendido. Si la posición de la manivela es correcta, los pistones de ambos gatos bajarán automáticamente.
6. Apagar la central hidráulica, en la tecla de apagado del programa. Apagar los ordenadores de control.
7. Desenchufar las mangueras de los gatos, retirarlas lejos de la viga.
8. Colocar los elementos de suspensión de la viga de la siguiente forma, cuidando que la separación entre 1-2, 3-4 sea tal que un solo puente grúa pueda levantar cada semiviga, de esta forma (Figura A6.2.3-6):

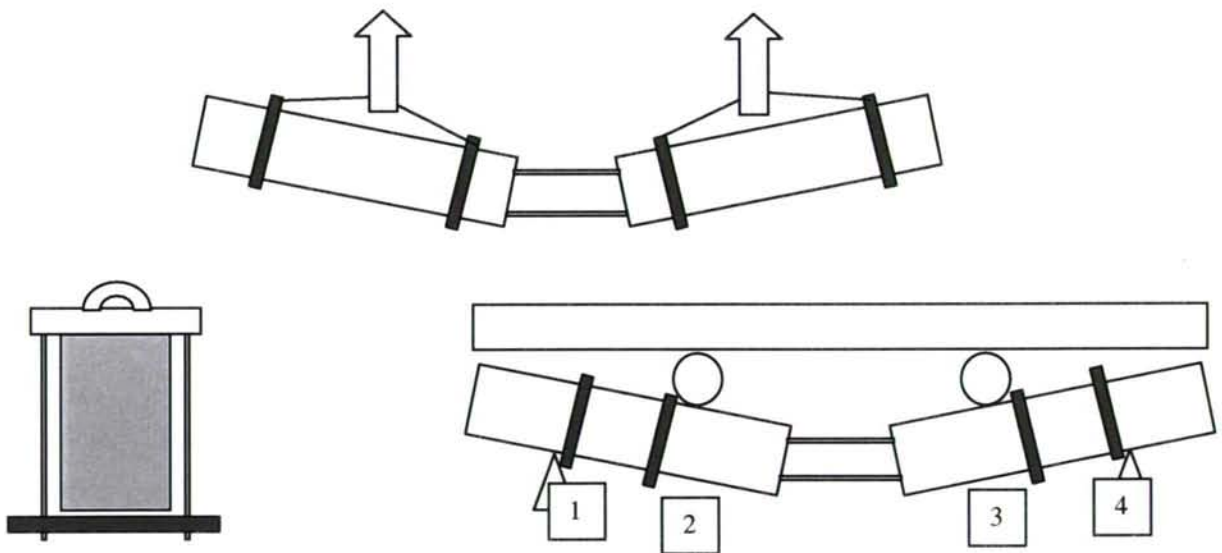


Figura A6.2.3-6

9. Desenroscar los anclajes del pórtico de ensayos.
10. Proteger las terminales del pórtico de ensayos mediante plásticos.
11. Levantar el pórtico de ensayos y colocarlo en la parte de atrás de la nave.
12. Colocar los apoyos de la viga metálica, disponiendo cuñas en ambos apoyos.
13. Izar la viga metálica y restituirla a la posición de origen.
14. Colocar tabloncillos debajo de los soportes 2 y 3, para amortiguar la posible caída de los segmentos de viga.
15. Izar cada tramo de la viga ensayada por los ganchos 1, 2, 3 y 4, teniendo cuidado de que estén situados a la misma posición desde ambos extremos (Figura A6.2.3-7).

16. En caso de que se observe inestabilidad en el conjunto al izar la viga rota, guardando la distancia de seguridad (viene dada por las protecciones laterales) cortar con soplete los cables de la zona central de la viga.

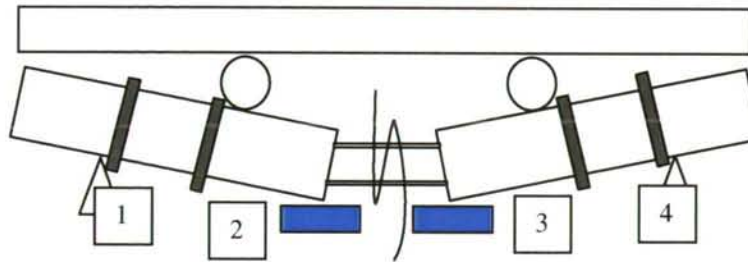


Figura A6.2.3-7

De esta manera se dividirá la viga en dos tramos, que se trasladarán independientemente.









17. Colocar los apoyos de la viga de hormigón, disponiendo cuñas en ambos apoyos.
18. Trasladar la viga a su posición definitiva.
19. Medir las contraflechas de las vigas restantes.



## Anexo 7

# MAPA DE FISURAS DE LOS PRISMAS Y LAS VIGAS

### Signos convencionales:

	<i>Carga aplicada</i>
	<i>Fisura longitudinal visible</i>
	<i>Fisuras transversales</i>
	<i>Línea de rotura</i>
	<i>Zona desconchada</i>
	<i>Fisuras no visibles a simple vista</i>
	<i>Microfisuras</i>
	<i>Microfisuras superficiales</i>

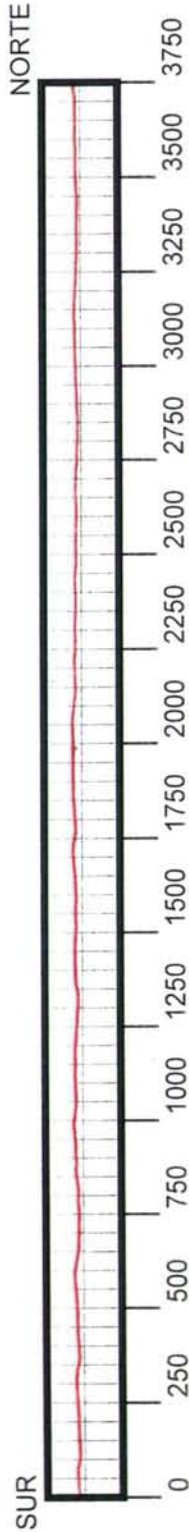
(cotas en mm)



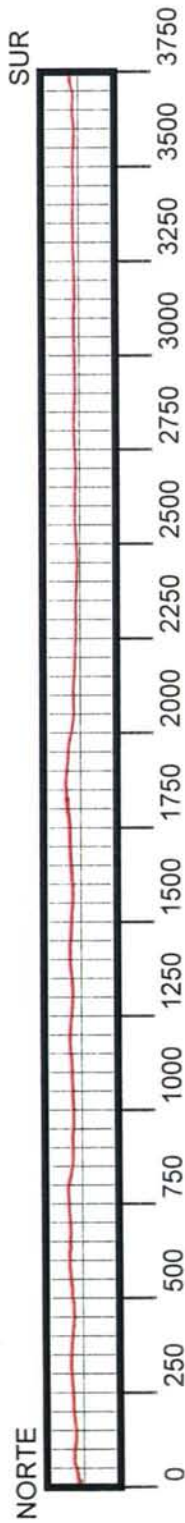


# PRISMA: P1L10-1

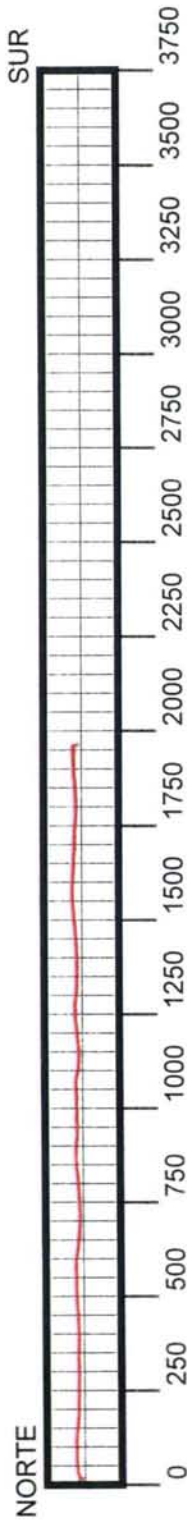
CARA ESTE



CARA OESTE



CARA SUPERIOR

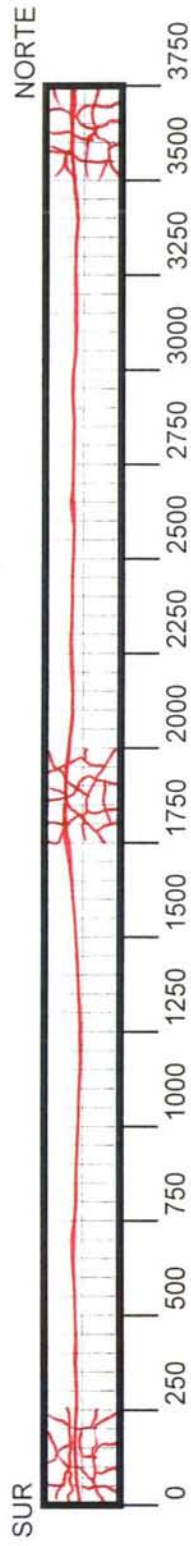


CARA INFERIOR

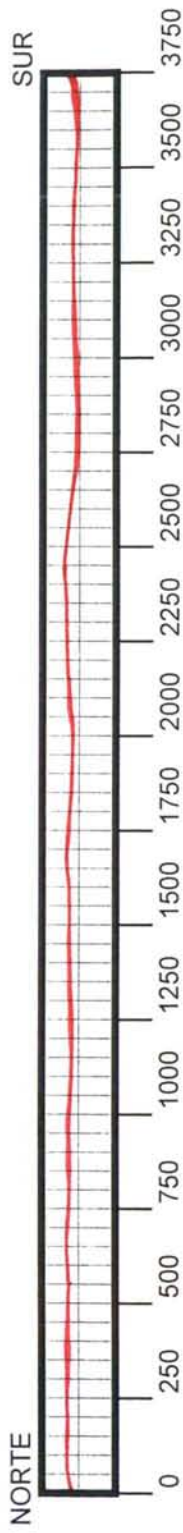


# PRISMA: P2L10-1

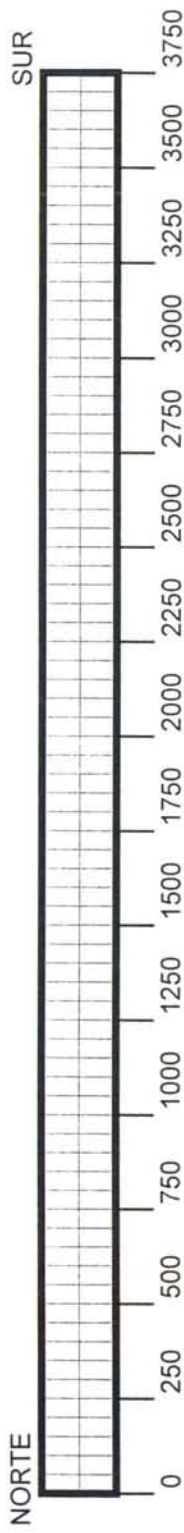
CARA ESTE



CARA OESTE



CARA SUPERIOR



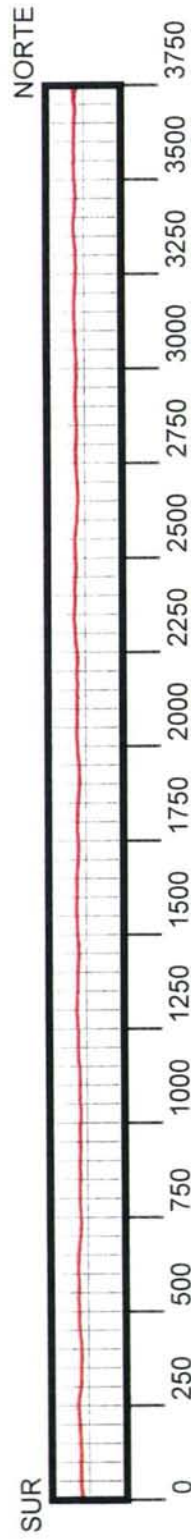
CARA INFERIOR



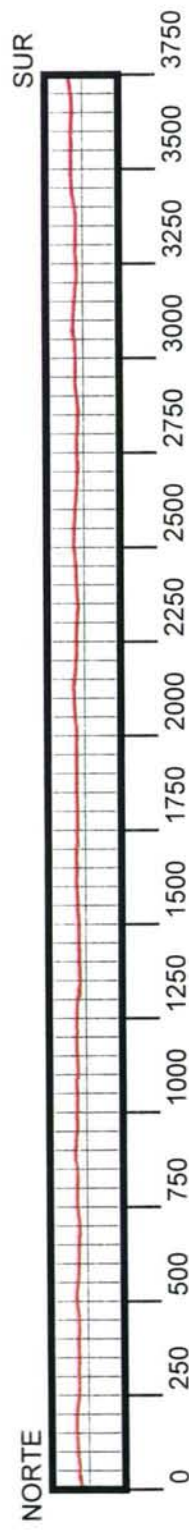


# PRISMA: P3L10-1

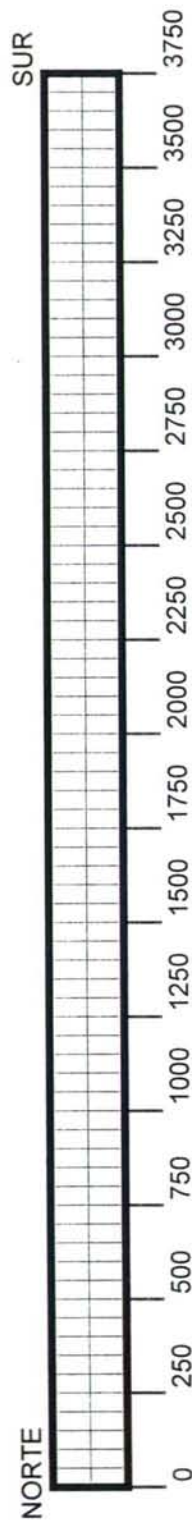
CARA ESTE



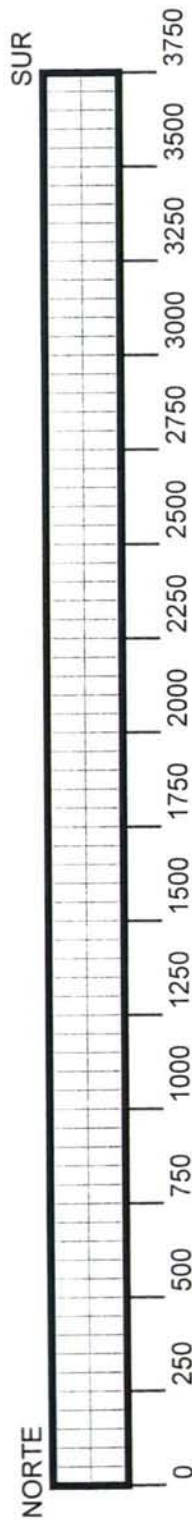
CARA OESTE



CARA SUPERIOR

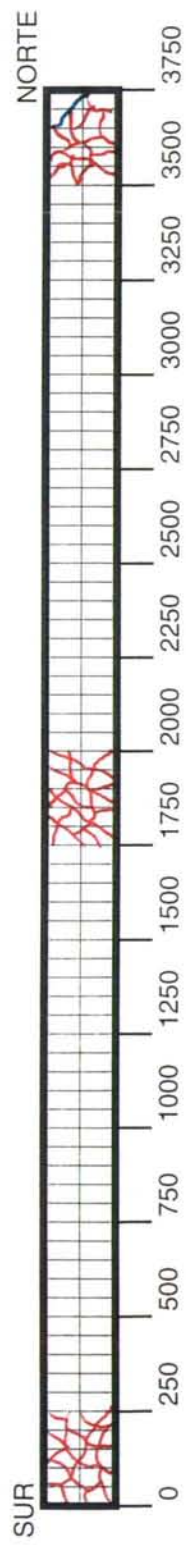


CARA INFERIOR

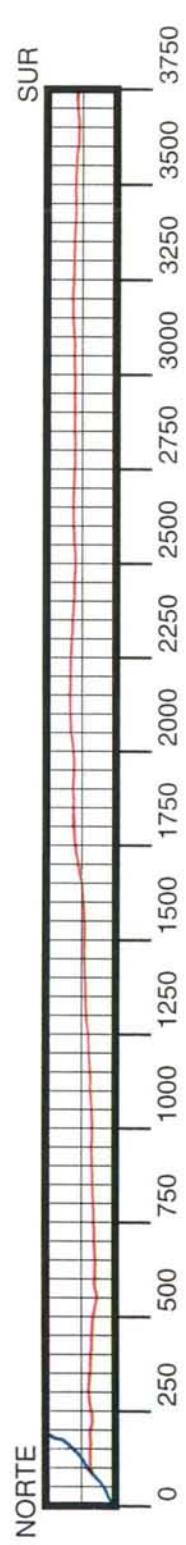


PRISMA: P1L31

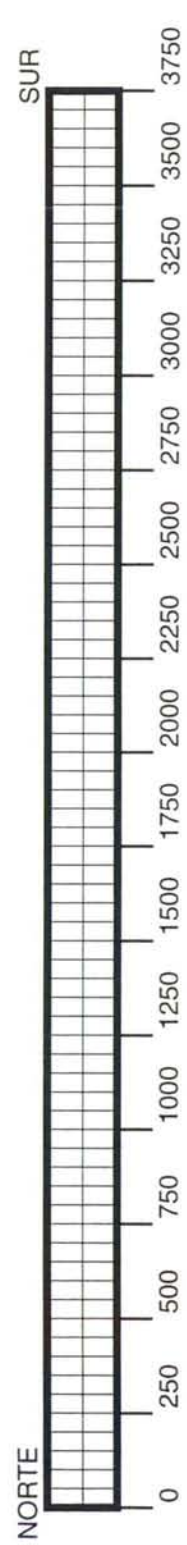
CARA ESTE



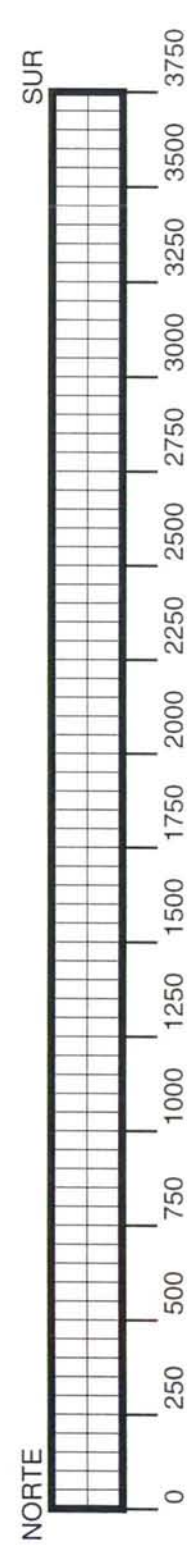
CARA OESTE



CARA SUPERIOR



CARA INFERIOR



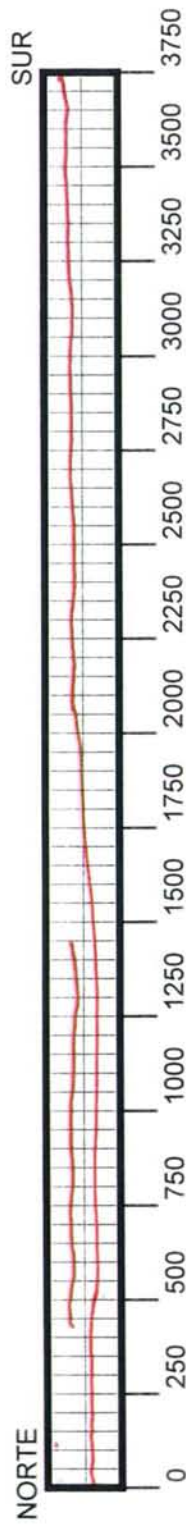


# PRISMA: P2L3-1

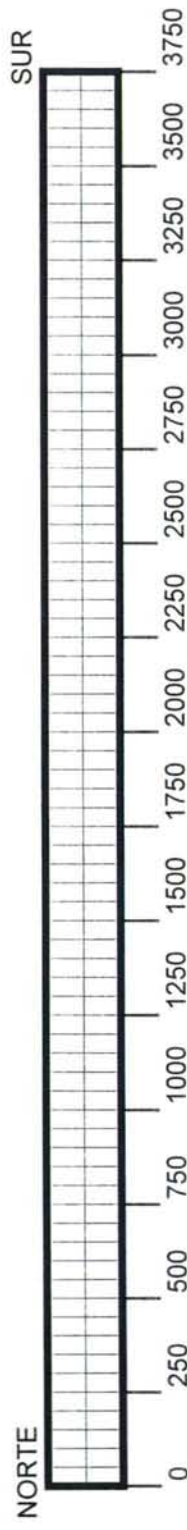
CARA ESTE



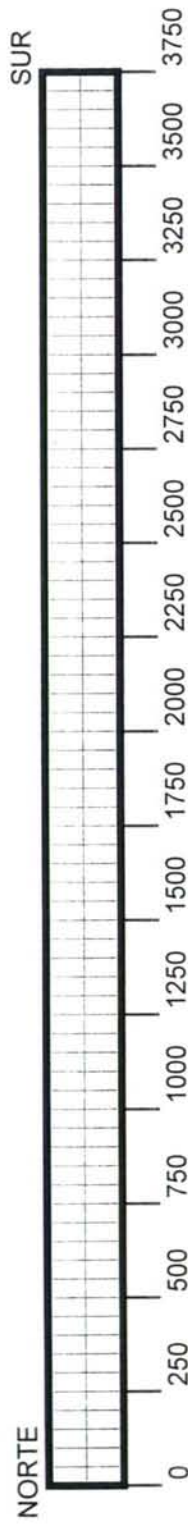
CARA OESTE



CARA SUPERIOR

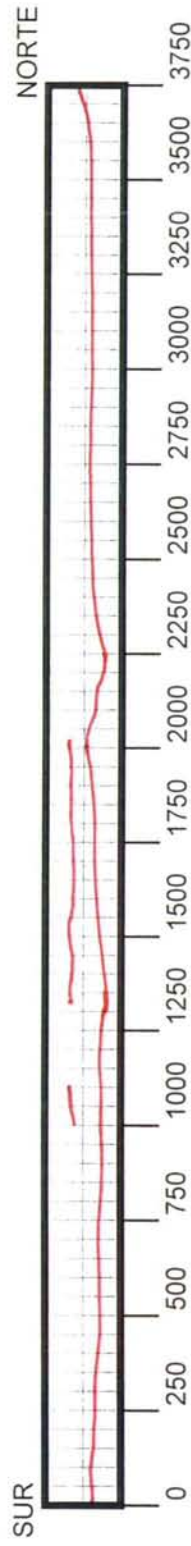


CARA INFERIOR

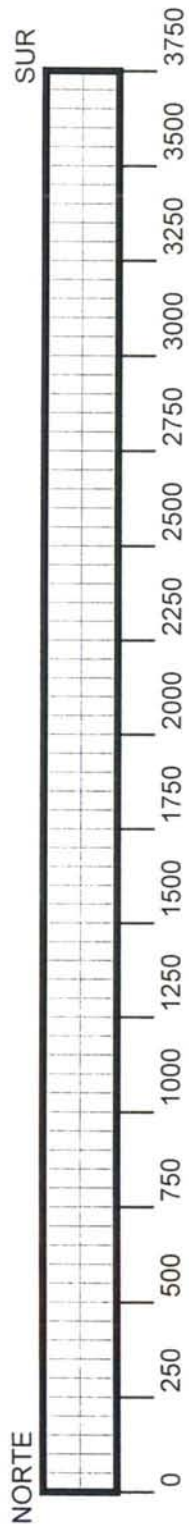


# PRISMA: P3L3-1

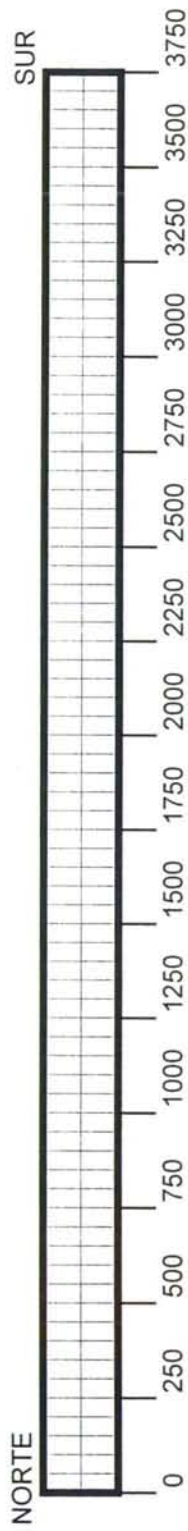
CARA ESTE



CARA OESTE



CARA SUPERIOR



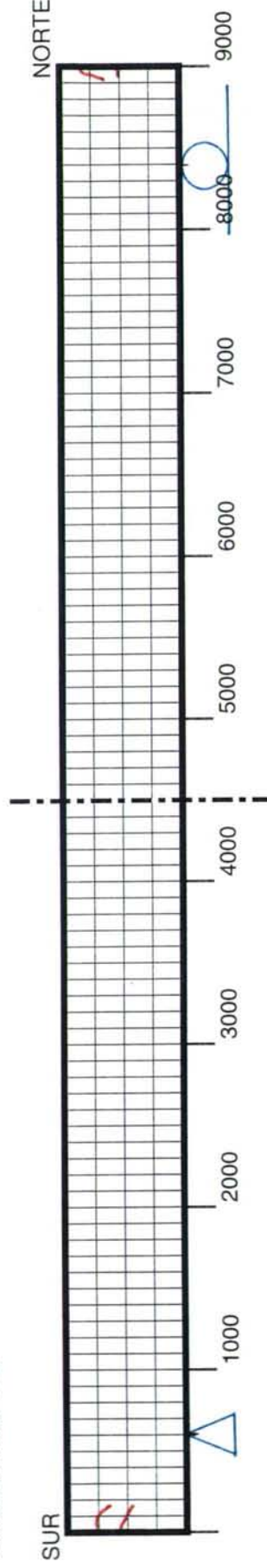
CARA INFERIOR



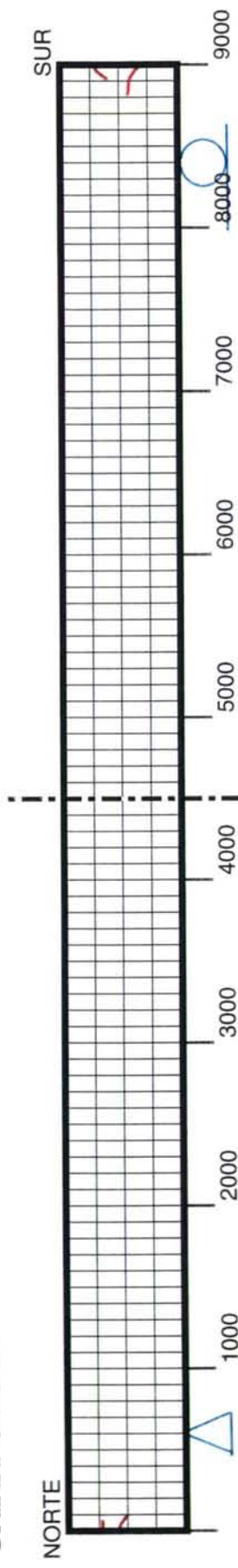


# VIGA: V1L10-1

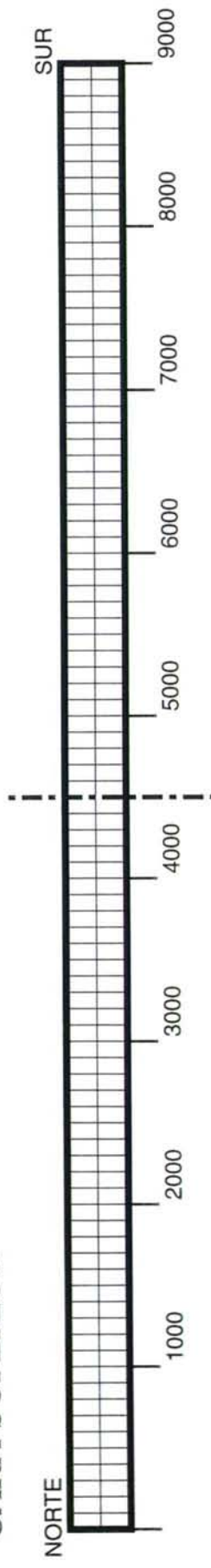
CARA ESTE



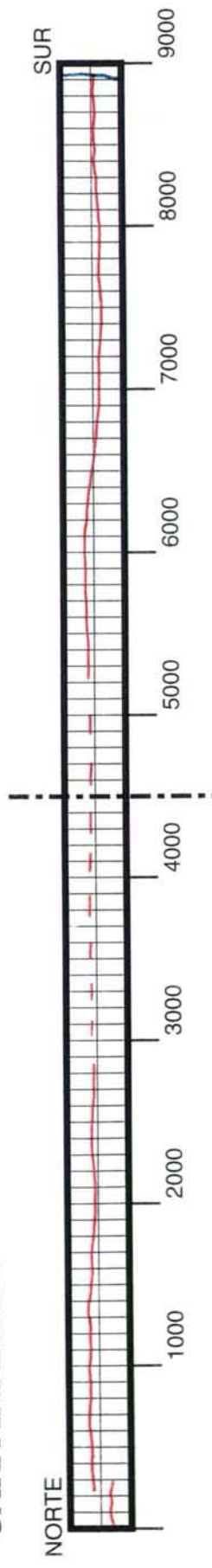
CARA OESTE



CARA SUPERIOR

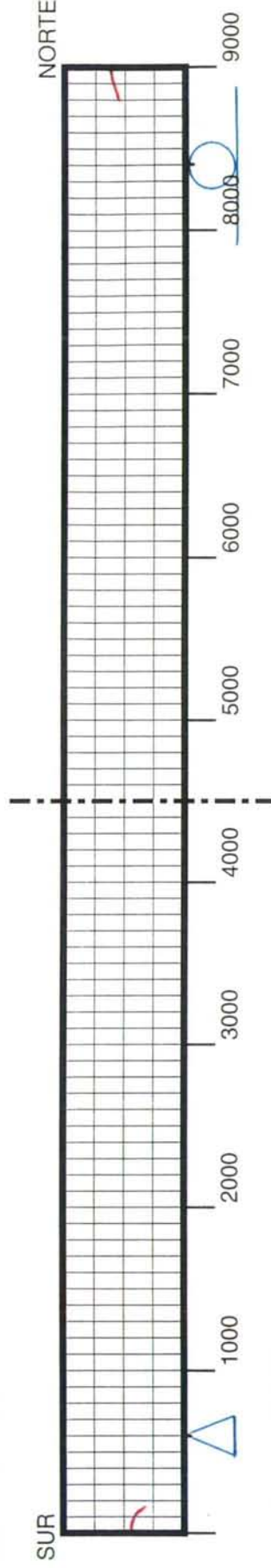


CARA INFERIOR

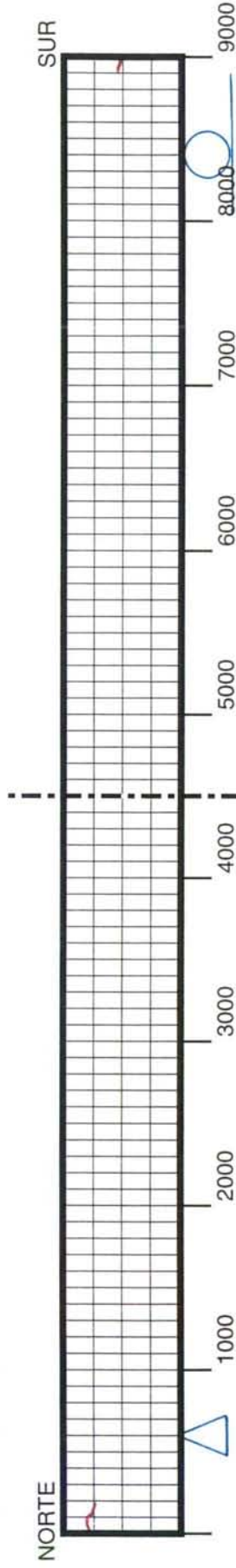


# VIGA: V2L10-1

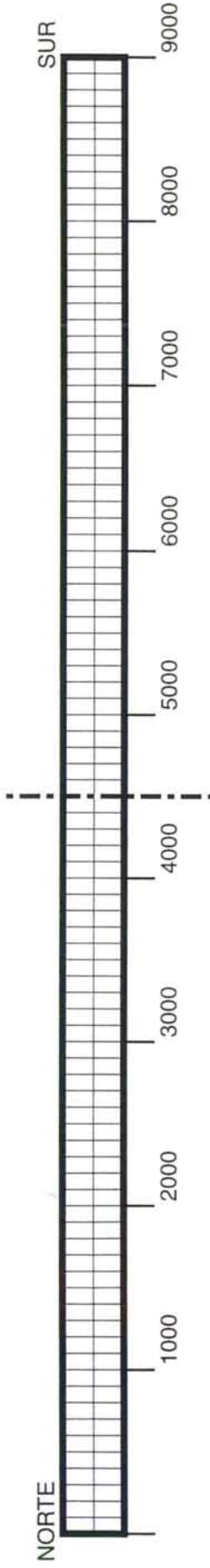
CARA ESTE



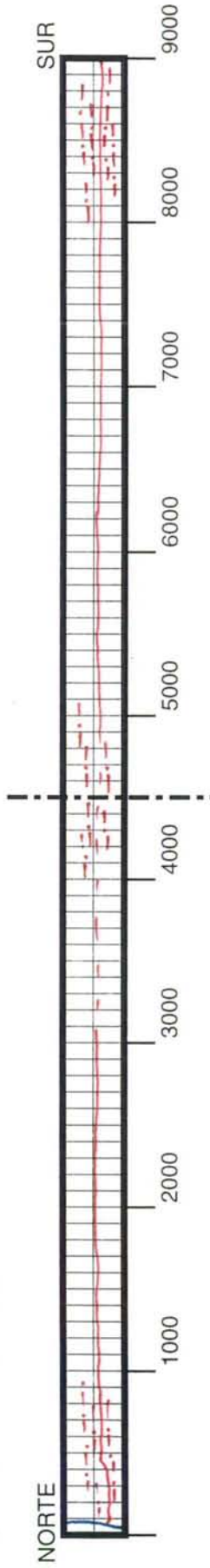
CARA OESTE



CARA SUPERIOR



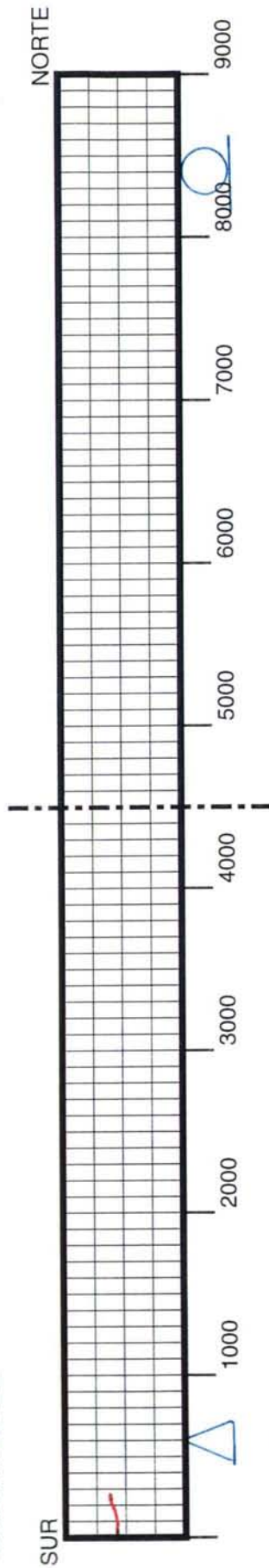
CARA INFERIOR



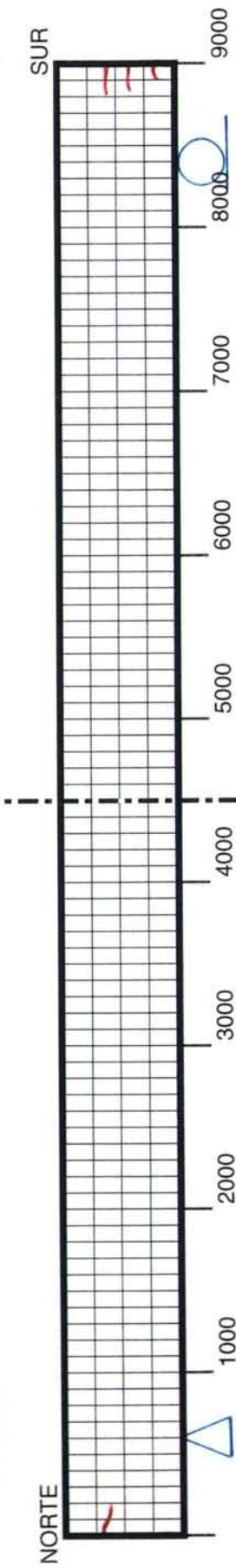


VIGA: V3L10-1

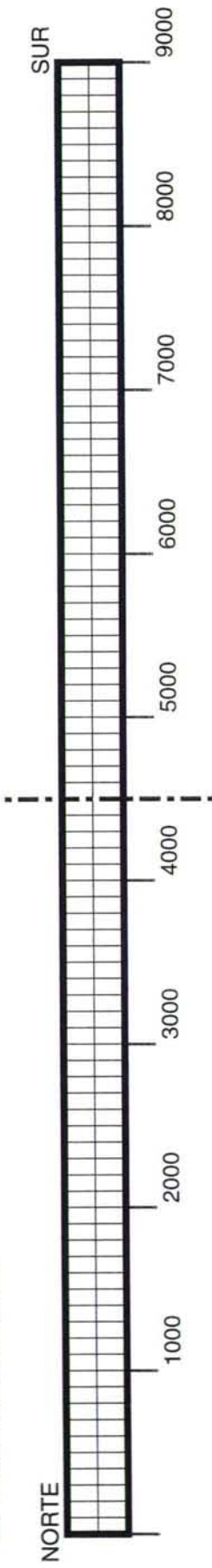
CARA ESTE



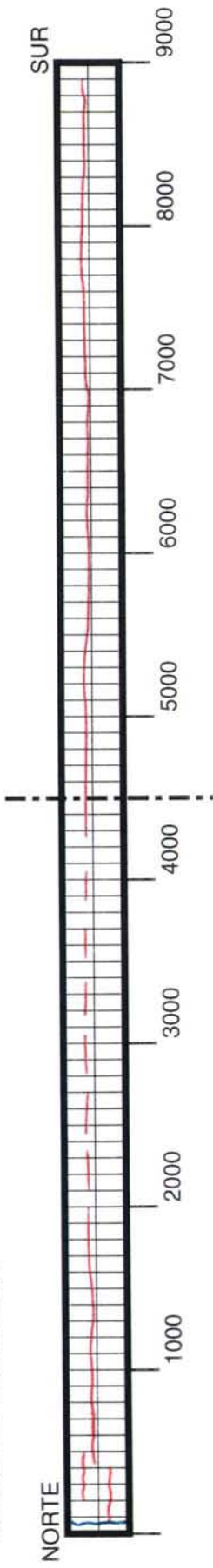
CARA OESTE



CARA SUPERIOR

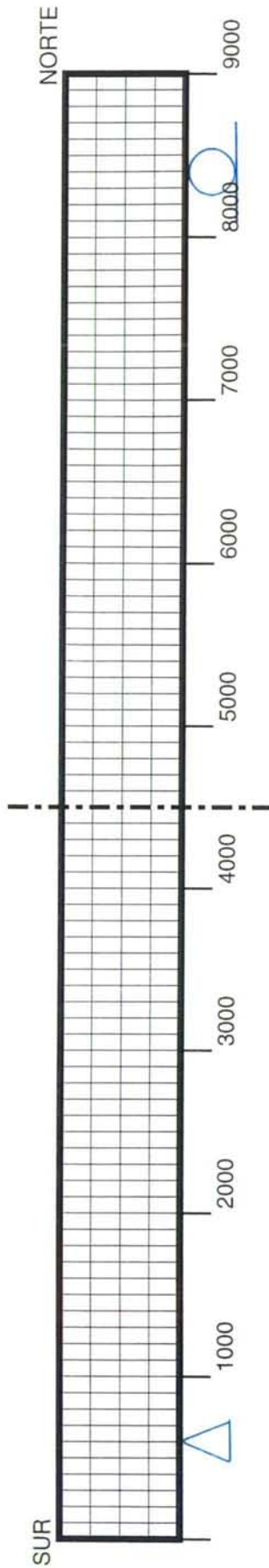


CARA INFERIOR

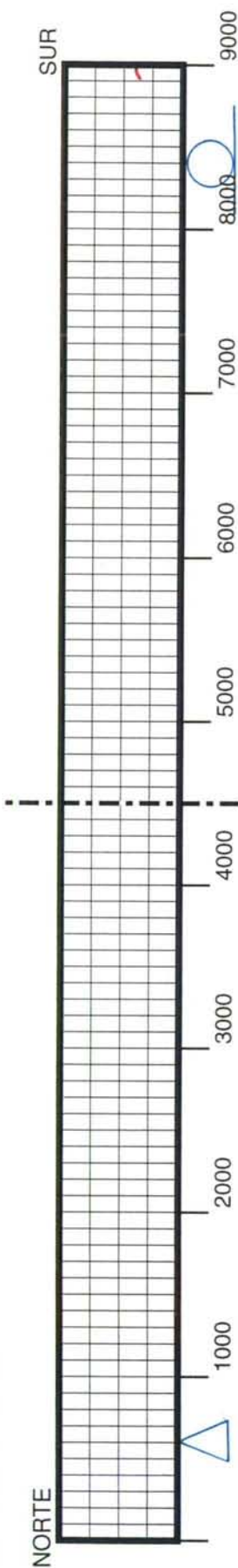


# VIGA: V4L10-1

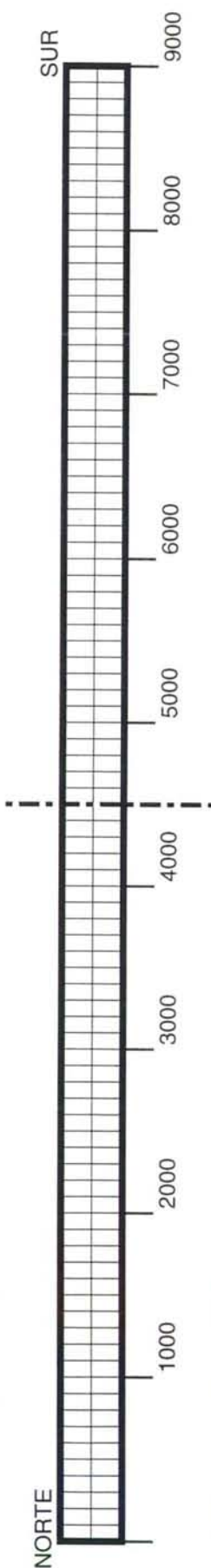
CARA ESTE



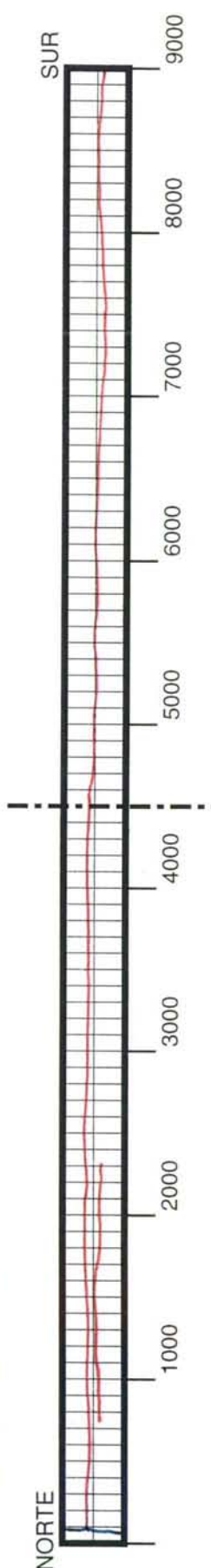
CARA OESTE



CARA SUPERIOR



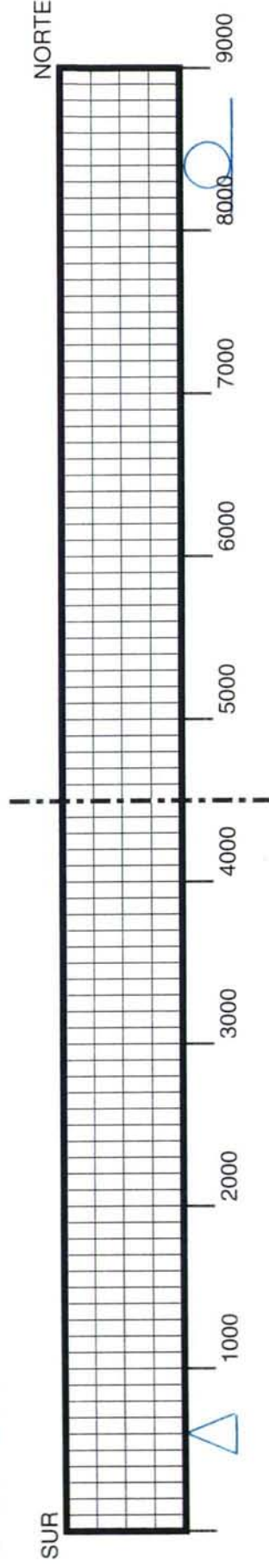
CARA INFERIOR



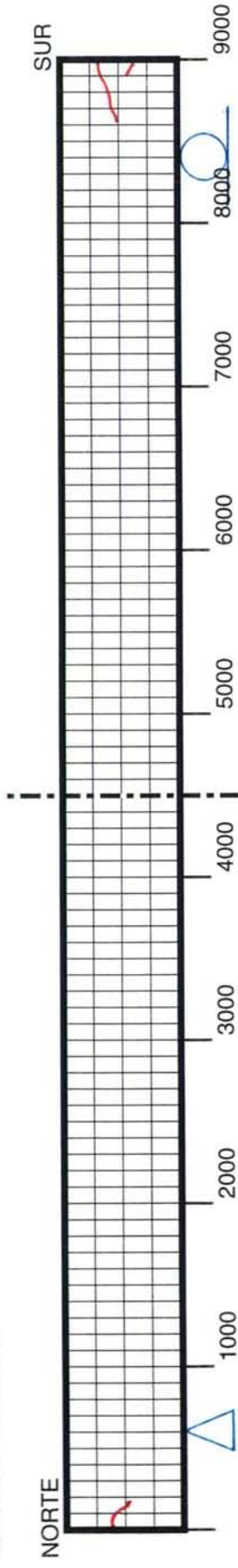


# VIGA: V5L10-1

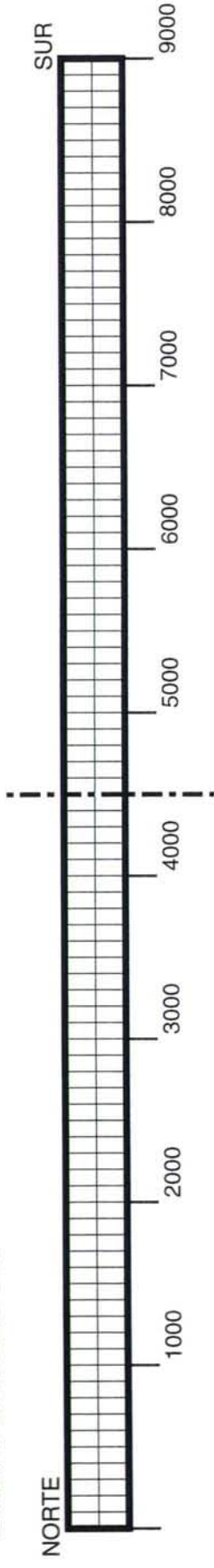
CARA ESTE



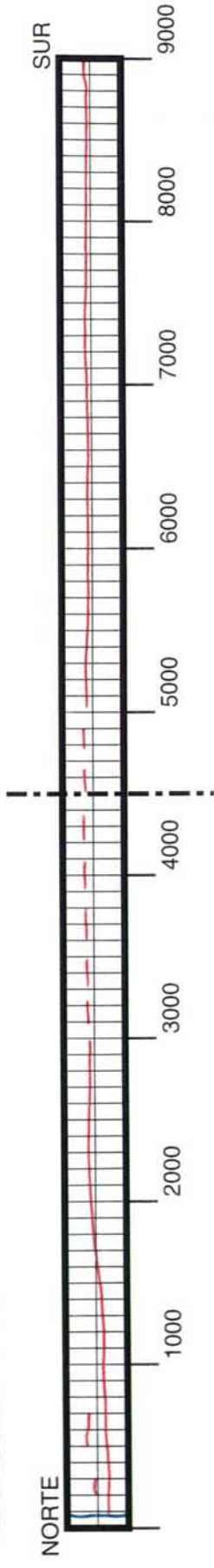
CARA OESTE



CARA SUPERIOR

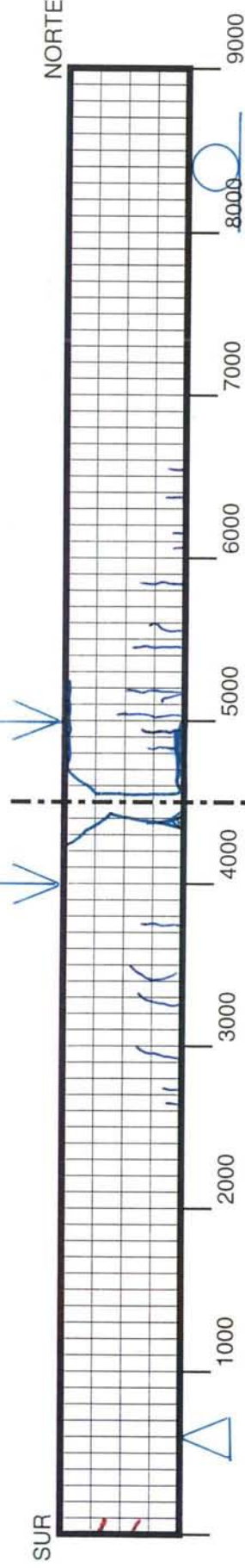


CARA INFERIOR

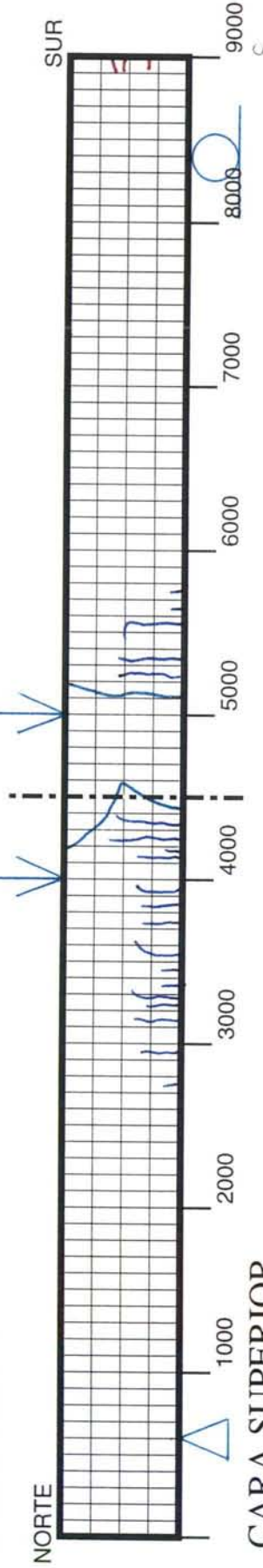


# VIGA: V6L10-1

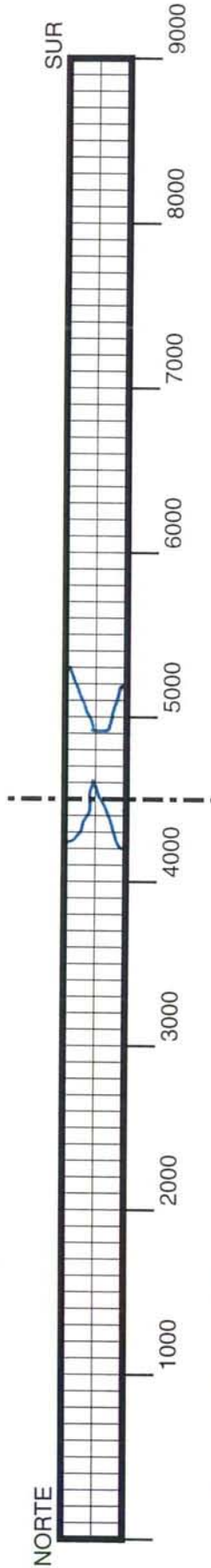
CARA ESTE



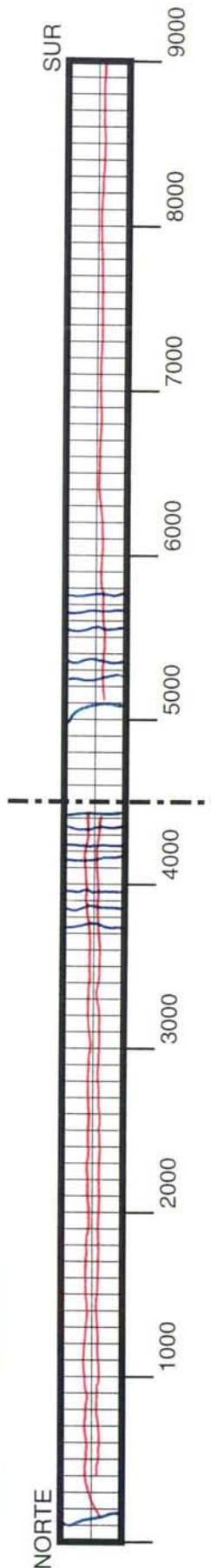
CARA OESTE



CARA SUPERIOR



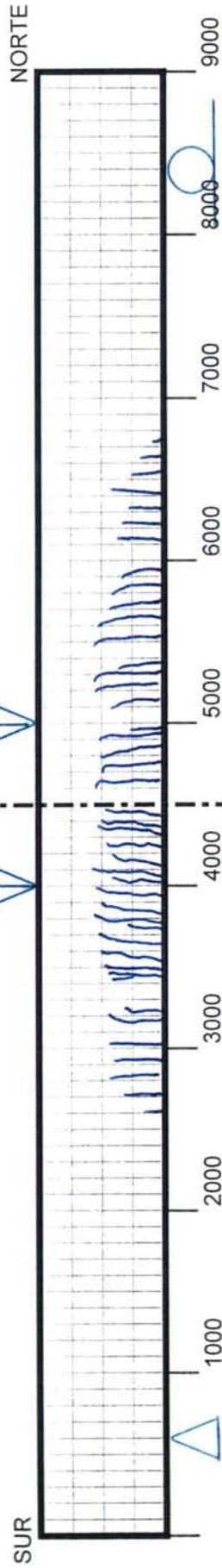
CARA INFERIOR



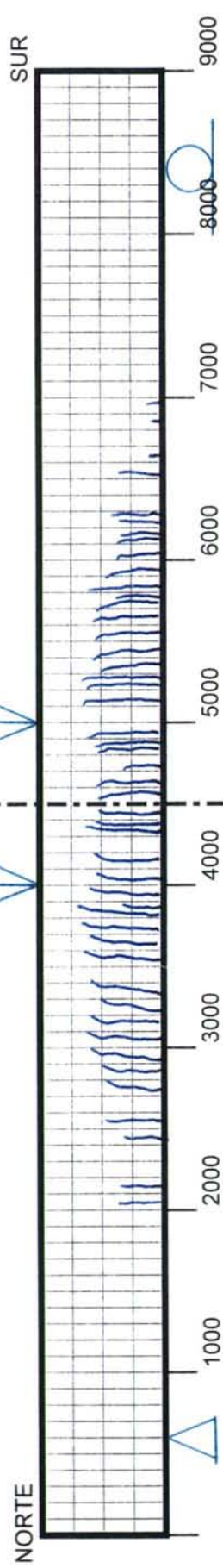


# VIGA: V7L10-1

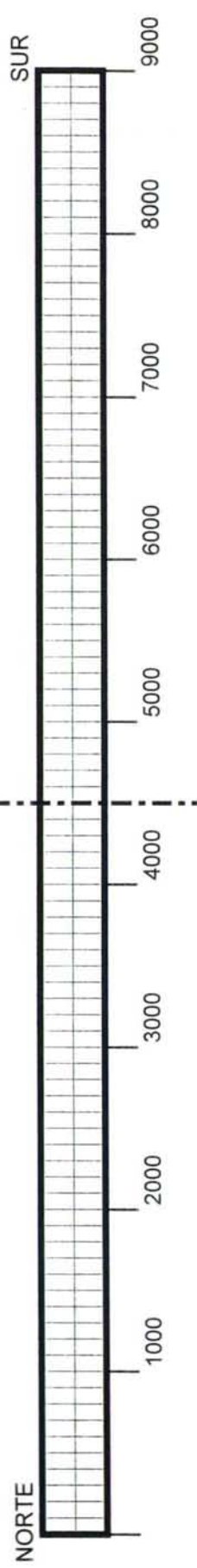
CARA ESTE



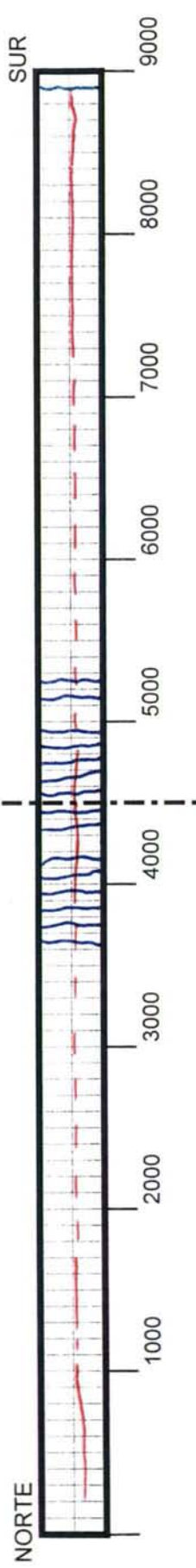
CARA OESTE



CARA SUPERIOR

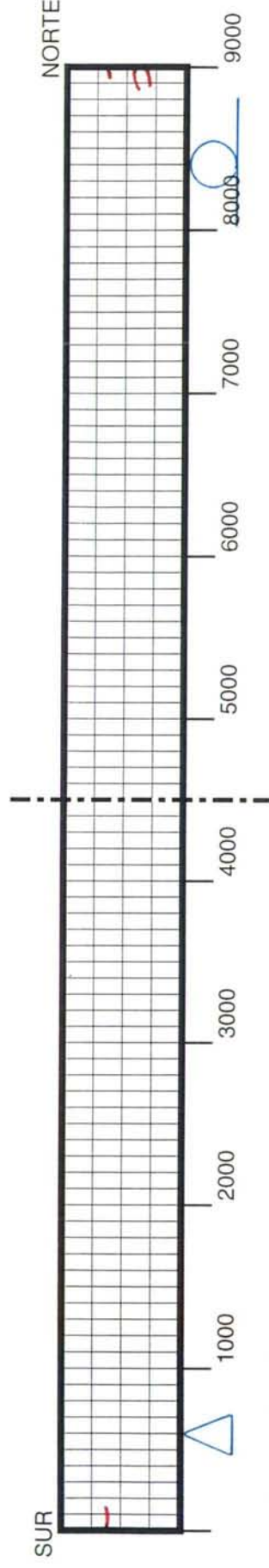


CARA INFERIOR

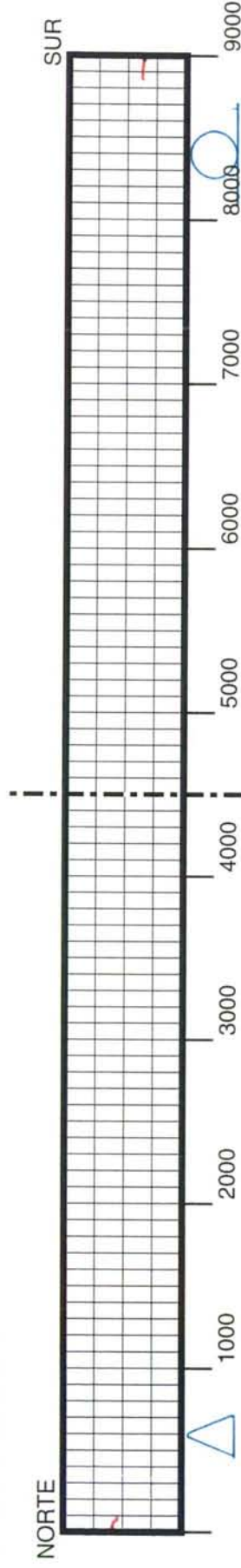


# VIGA: V8L10-1

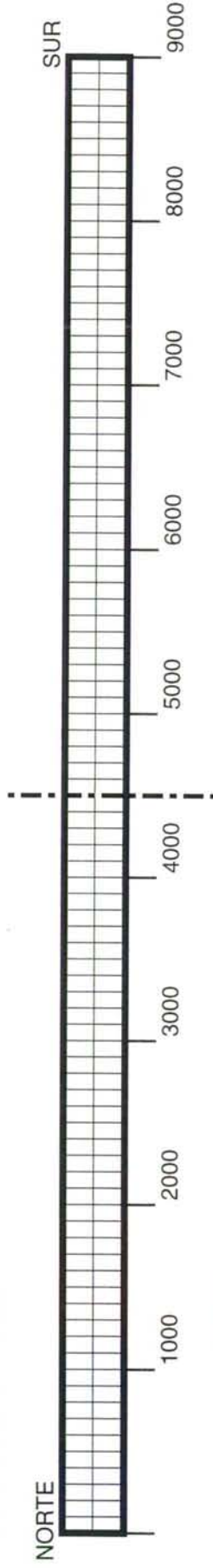
CARA ESTE



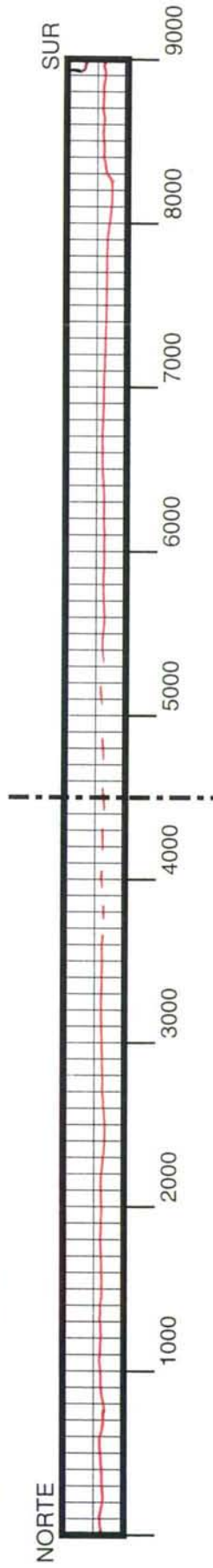
CARA OESTE



CARA SUPERIOR



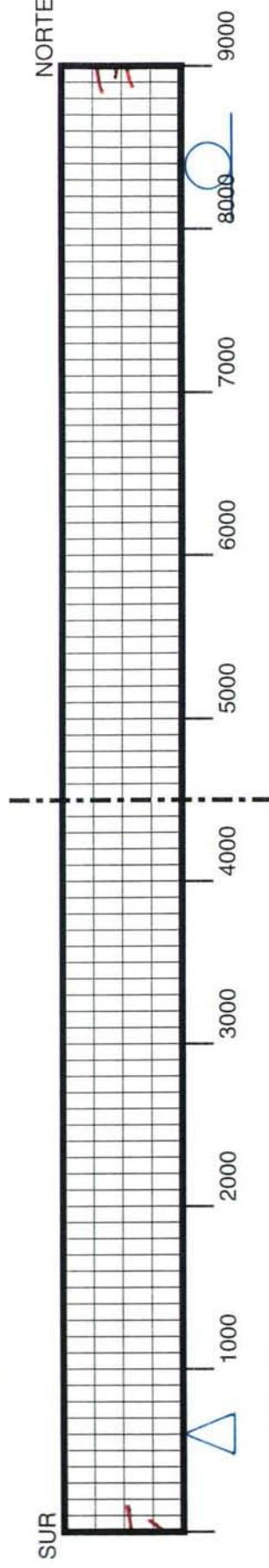
CARA INFERIOR



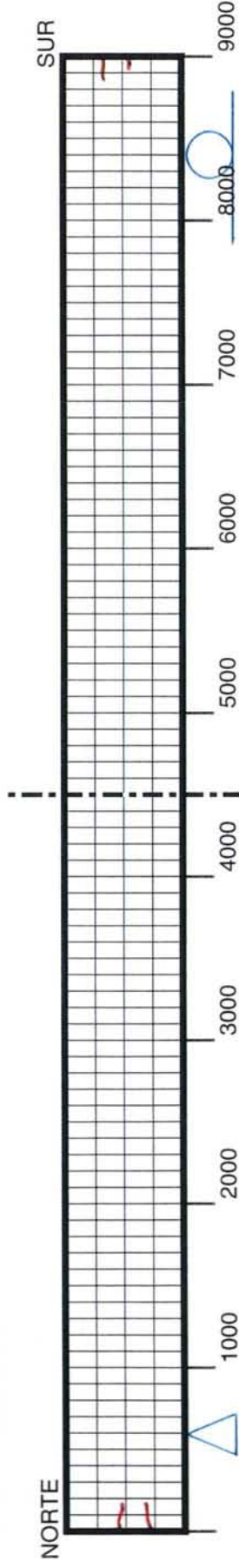


# VIGA: V9L10-1

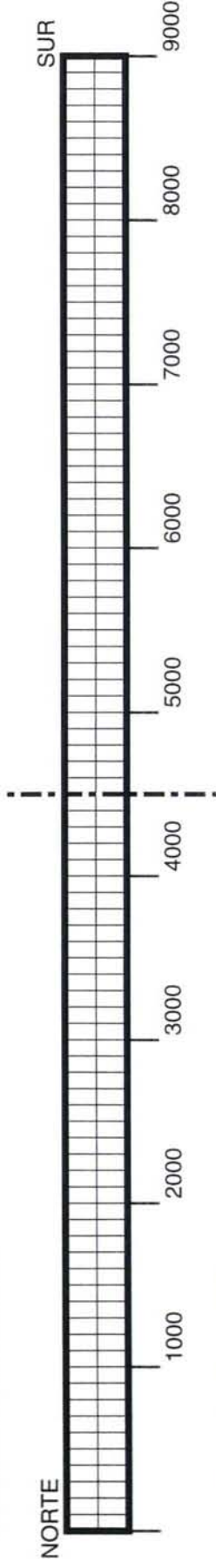
CARA ESTE



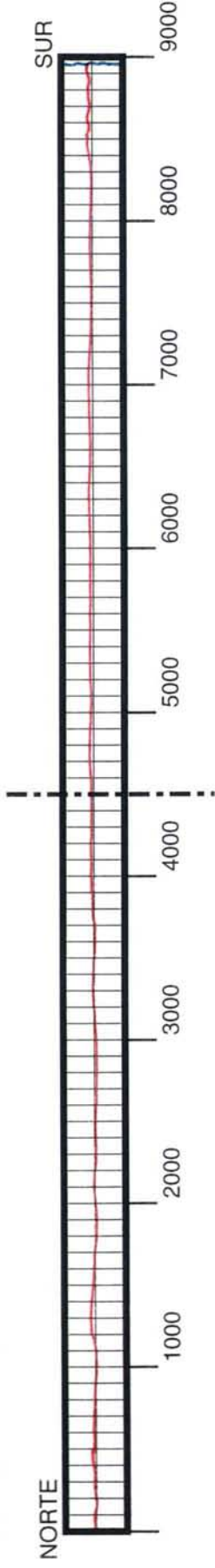
CARA OESTE



CARA SUPERIOR

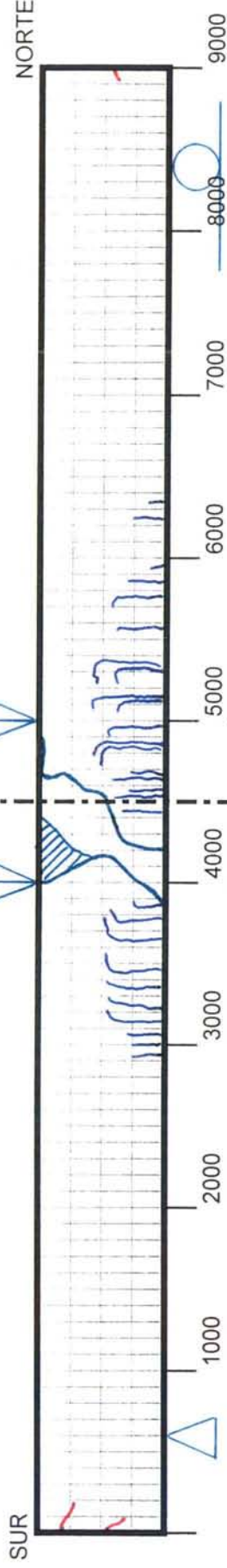


CARA INFERIOR

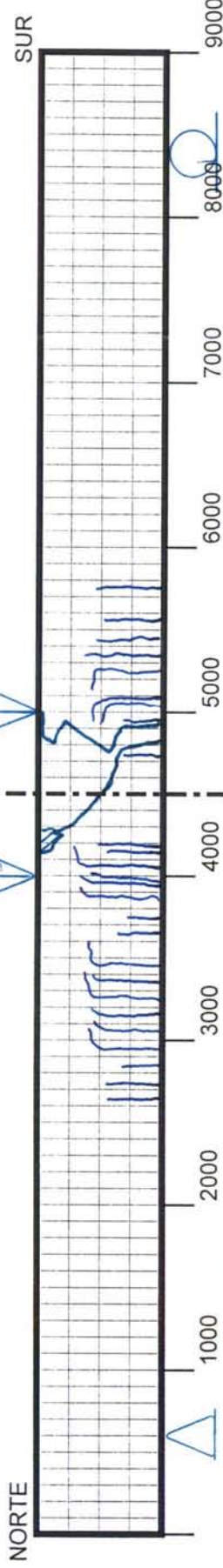


VIGA: V10L10-1

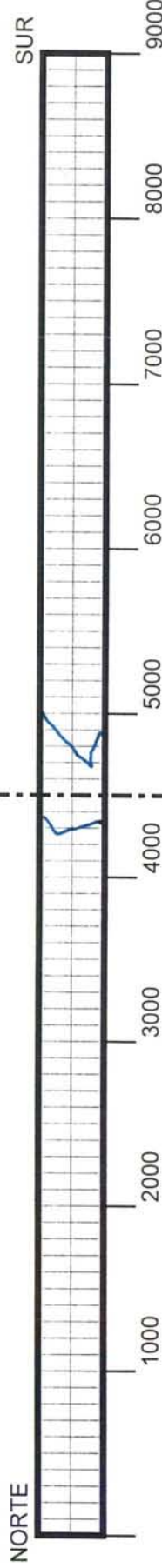
CARA ESTE



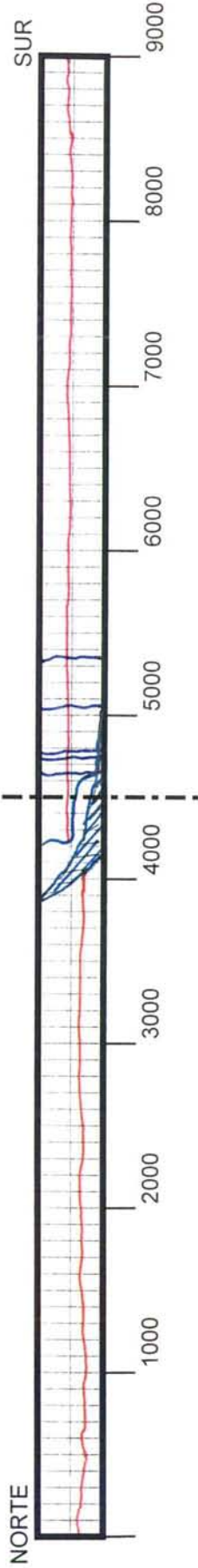
CARA OESTE



CARA SUPERIOR



CARA INFERIOR

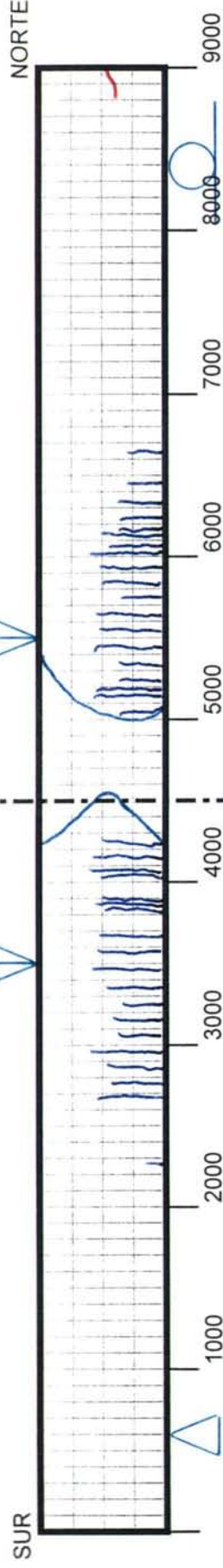




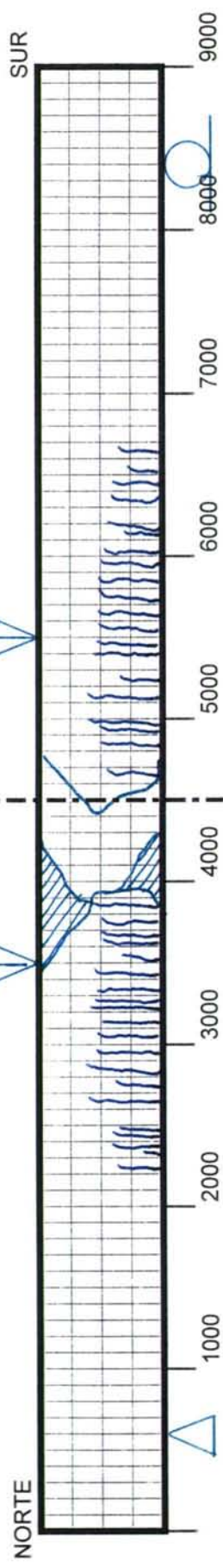


# VIGA: V11L10-1

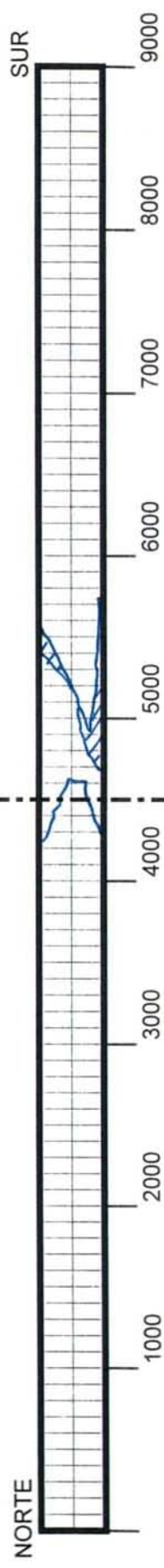
CARA ESTE



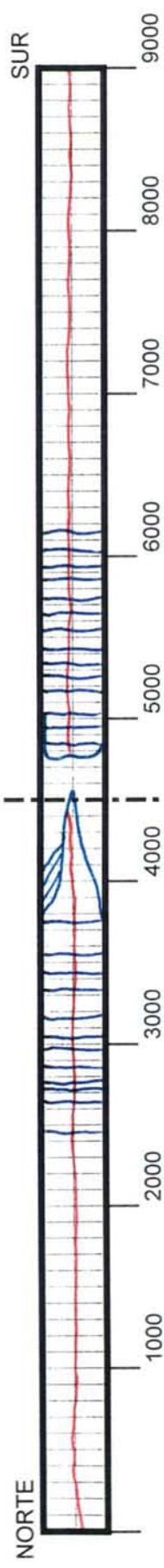
CARA OESTE



CARA SUPERIOR

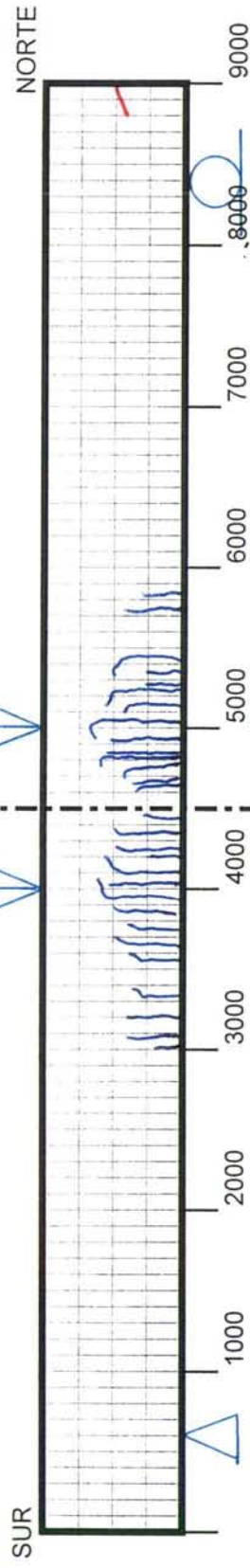


CARA INFERIOR

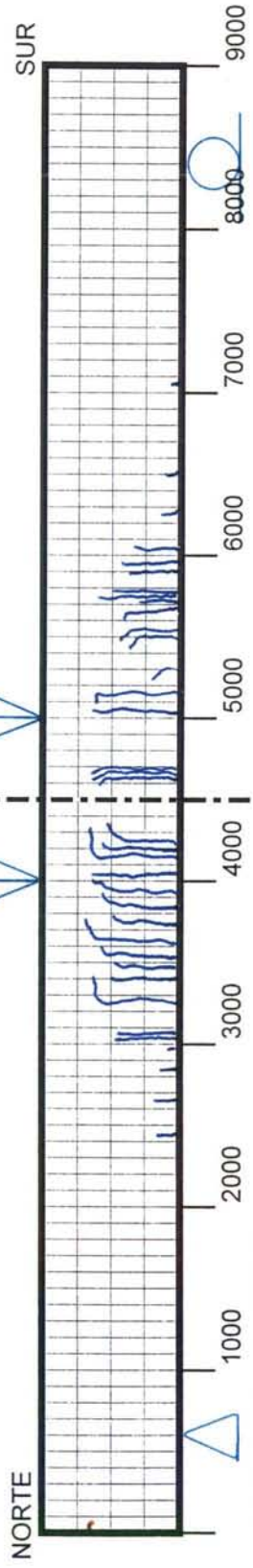


# VIGA: V12L10-1

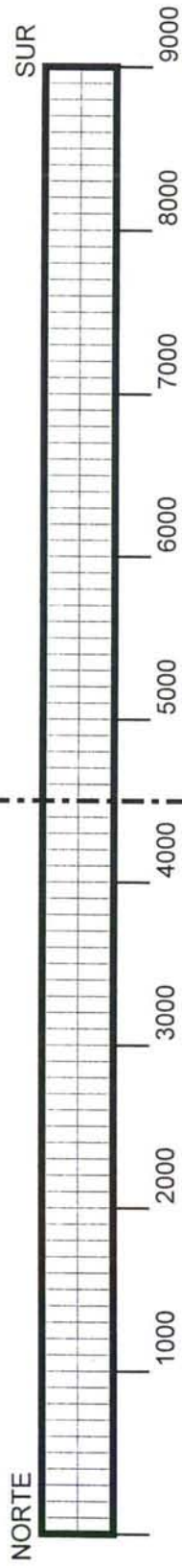
CARA ESTE



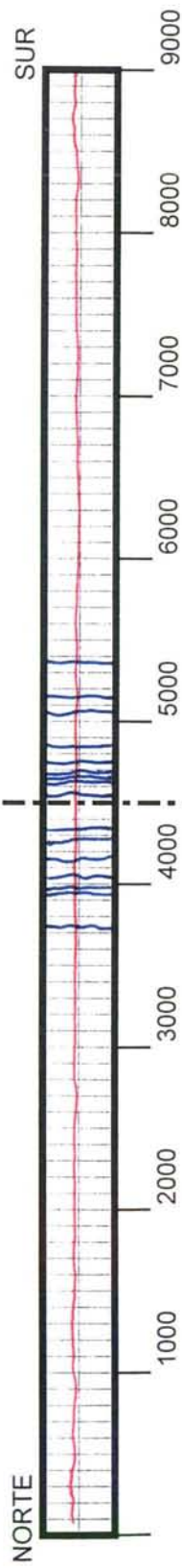
CARA OESTE



CARA SUPERIOR



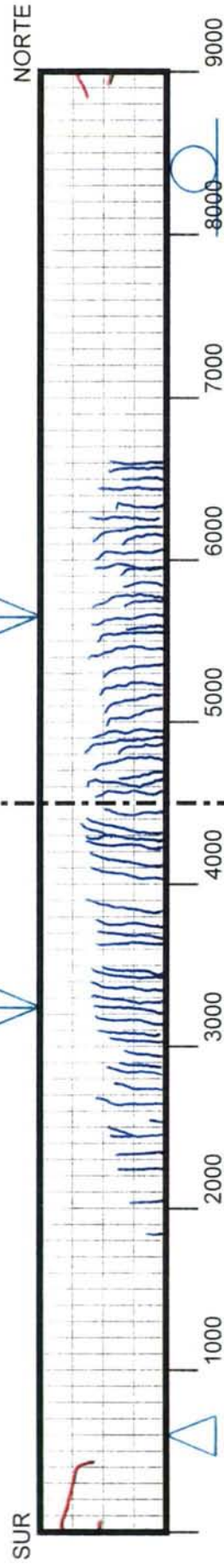
CARA INFERIOR



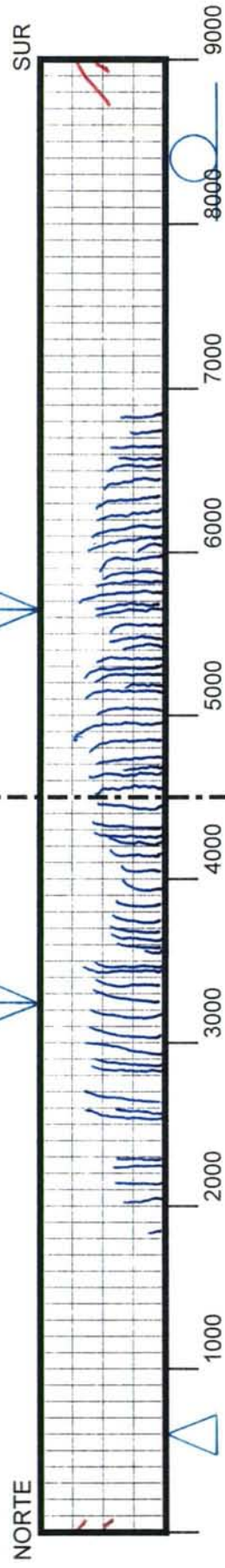


# VIGA: V1L10-2

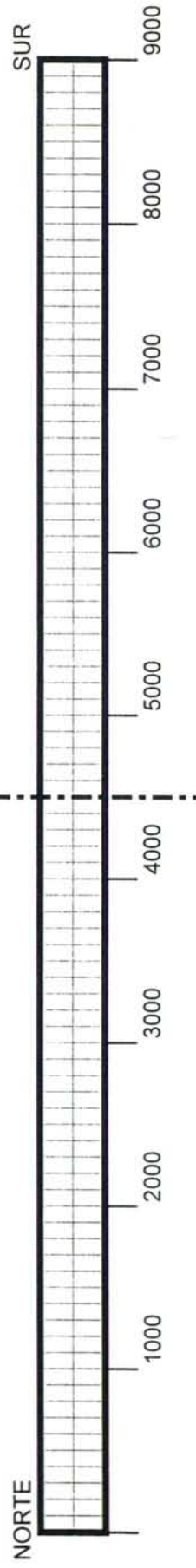
CARA ESTE



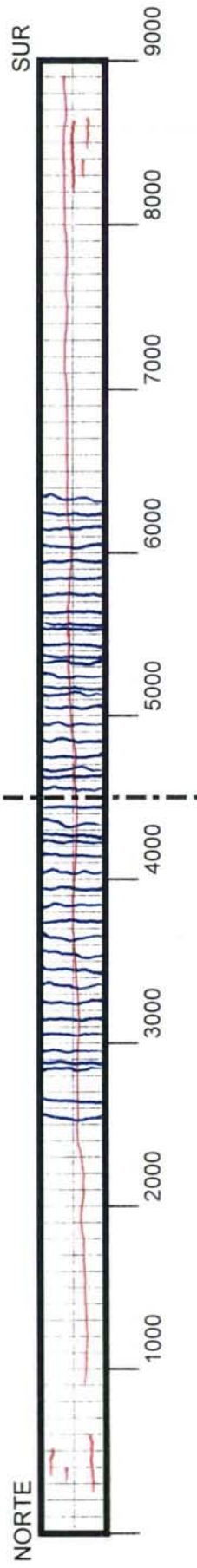
CARA OESTE



CARA SUPERIOR

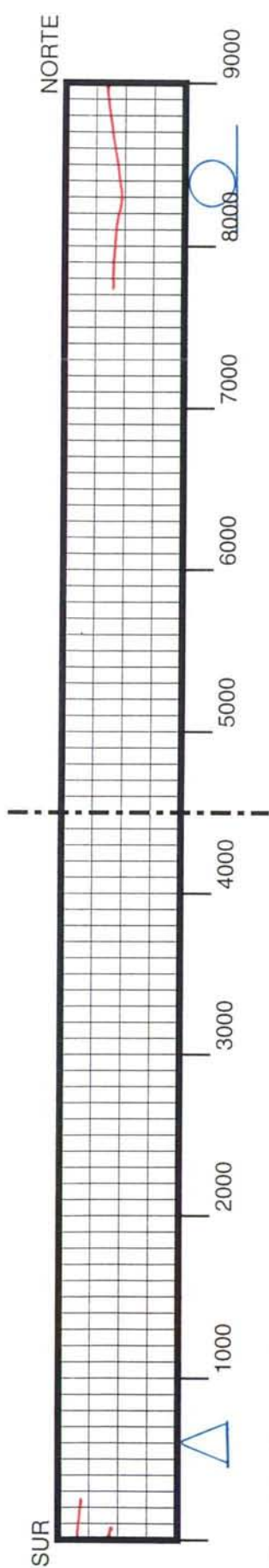


CARA INFERIOR

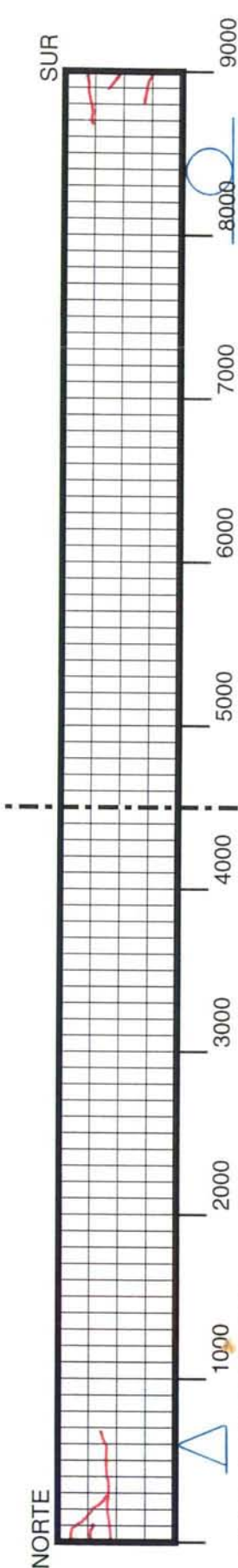


VIGA: V2L10-2

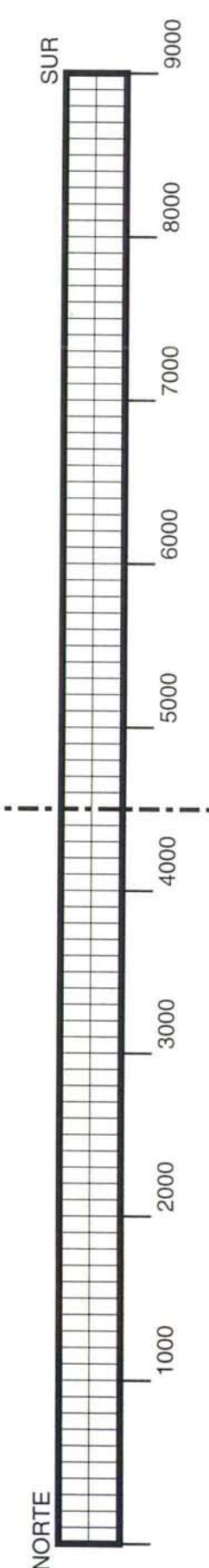
CARA ESTE



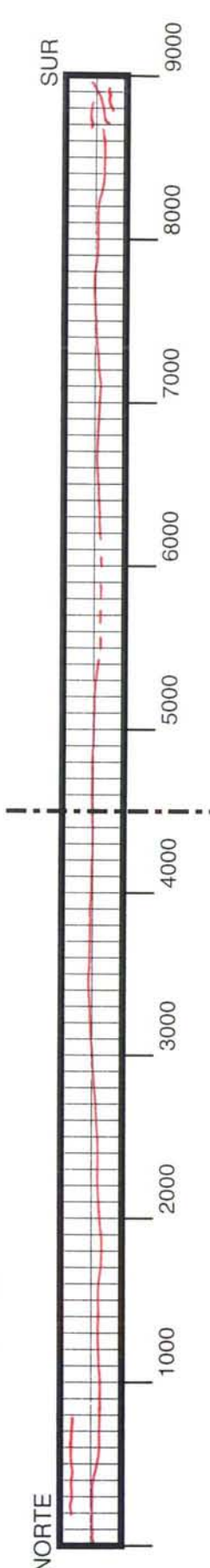
CARA OESTE



CARA SUPERIOR



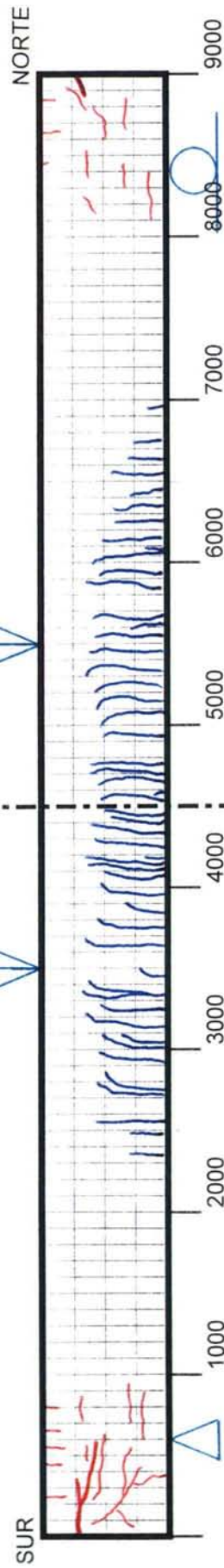
CARA INFERIOR



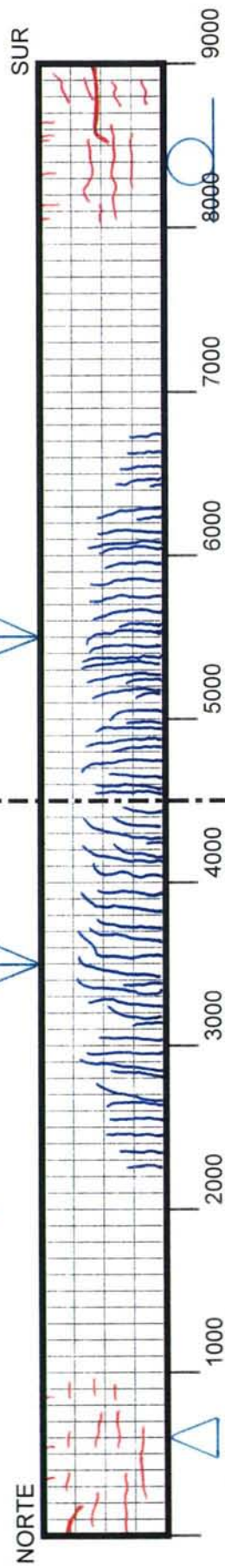


# VIGA: V3L10-2

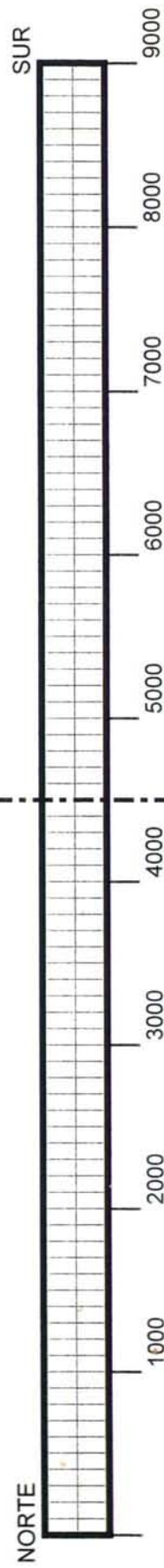
CARA ESTE



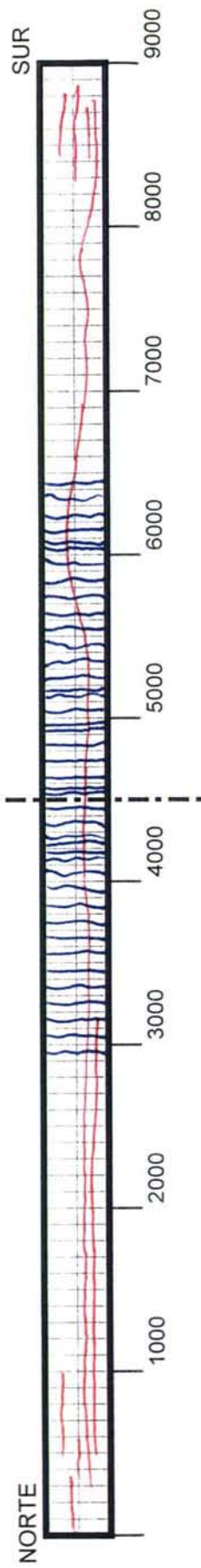
CARA OESTE



CARA SUPERIOR

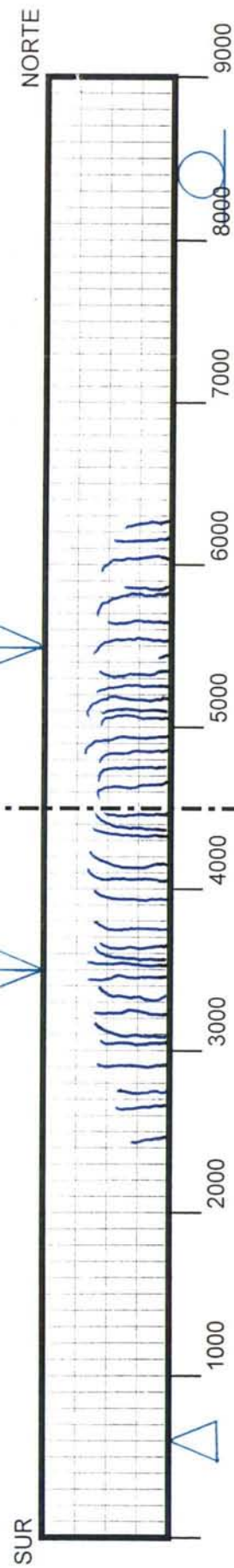


CARA INFERIOR

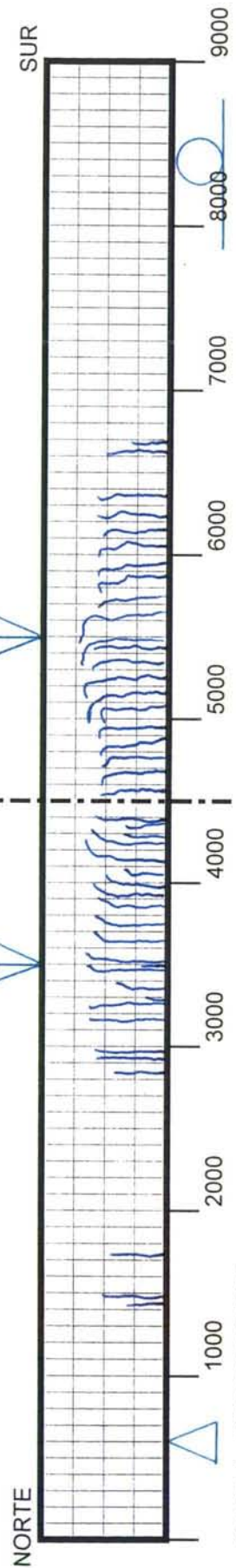


VIGA: V4C

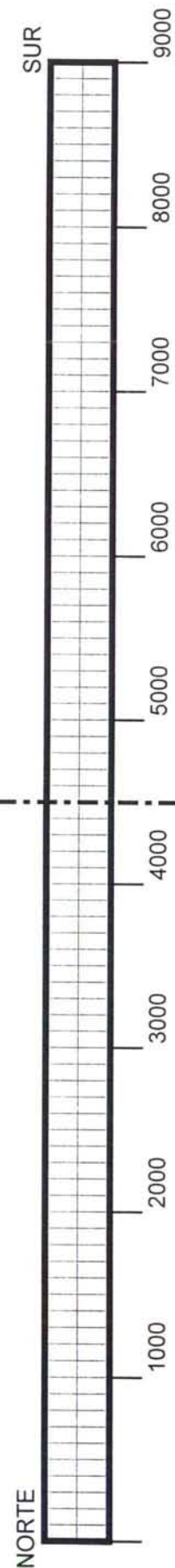
CARA ESTE



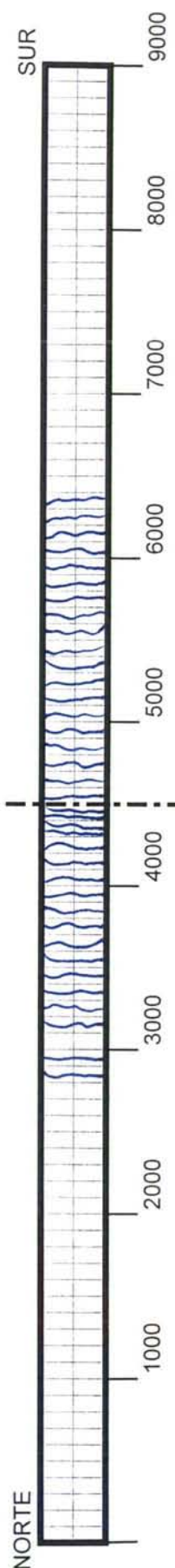
CARA OESTE



CARA SUPERIOR



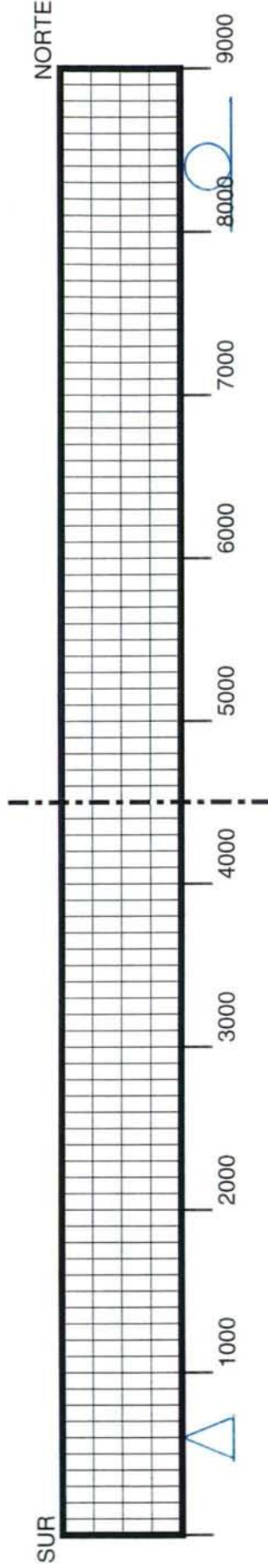
CARA INFERIOR



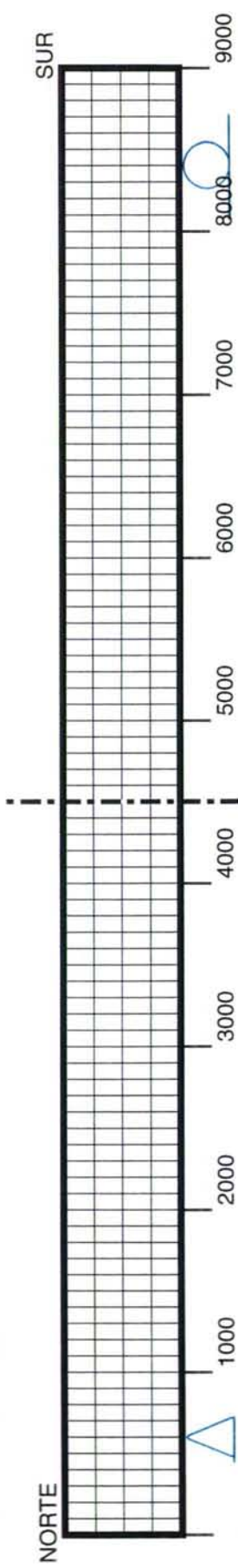


# VIGA: V5C

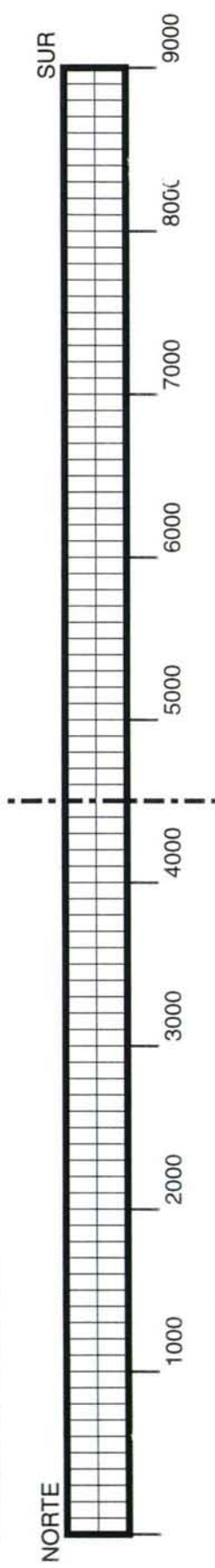
CARA ESTE



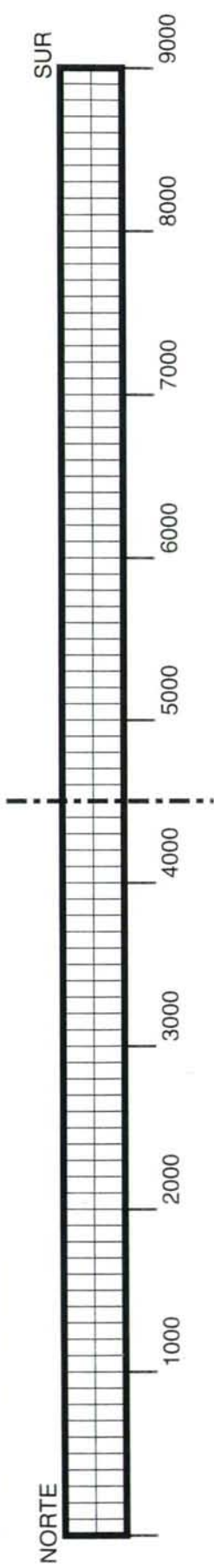
CARA OESTE



CARA SUPERIOR

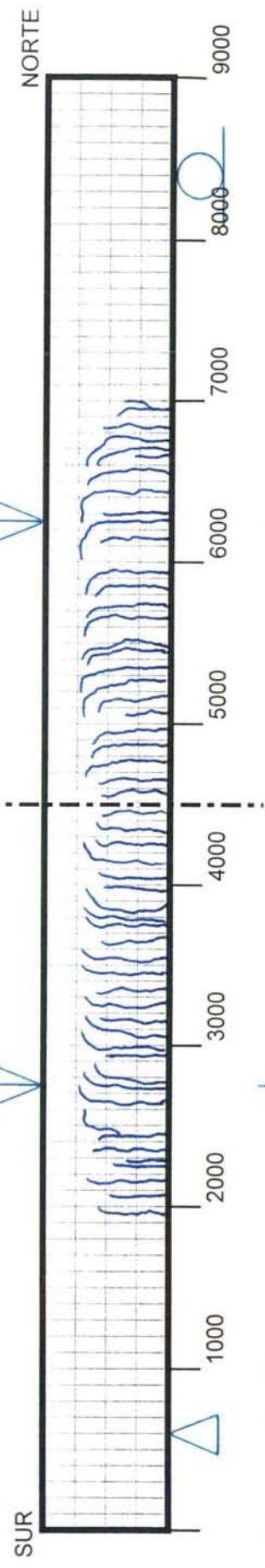


CARA INFERIOR

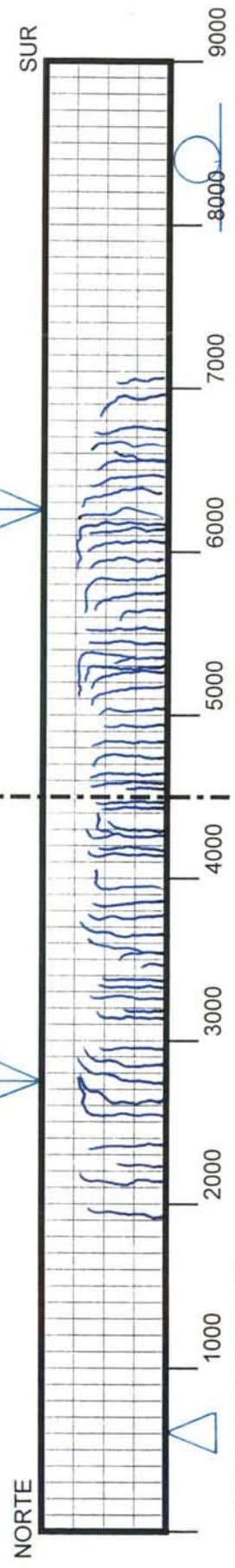


VIGA: V6C

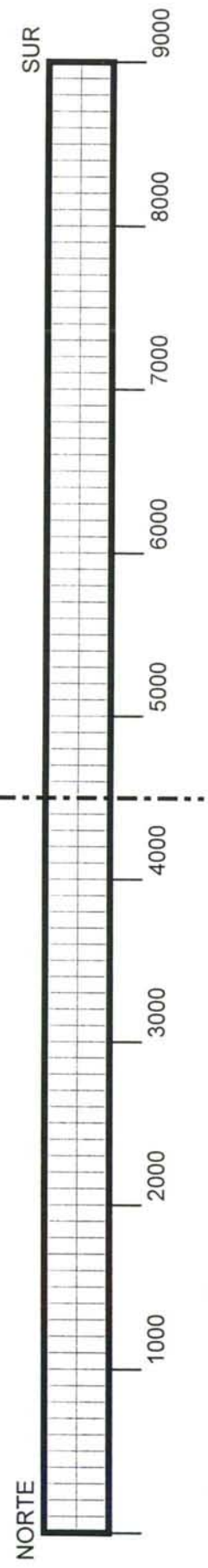
CARA ESTE



CARA OESTE



CARA SUPERIOR



CARA INFERIOR

